



TITLE:

水系計算制御に関する研究(Dissertation_全文)

AUTHOR(S):

井上, 幸美

CITATION:

井上, 幸美. 水系計算制御に関する研究. 京都大学, 1971, 工学博士

ISSUE DATE:

1971-09-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.r1859>

RIGHT:

水系計算制御に関する研究

昭和 45 年 12 月

井 上 幸 美

水系計算制御に関する研究

井 上 幸 美

DOC
1971
9
電気系

目 次

第 1 章	緒 論	1
1.1	はじめに	1
1.2	制御対象と制御目的	1
1.3	水系制御の問題点	2
1.4	研究内容の梗概	3
第 2 章	水系オンライン制御のための適応形流出予測機構	5
2.1	緒 言	5
2.2	河川流出予測機構の設定とそれにもなう問題点	5
2.2.1	予測機構の構造および形	5
2.2.2	予測期間と予測評価	7
2.2.3	代表雨量, 河川流量の観測	8
2.3	線形係数群による適応形予測機構	9
2.3.1	同定モデルと予測モデル	9
2.3.2	線形係数群の個数	10
2.3.3	線形係数群によるモデルの安定性と追従性	10
2.4	状態方程式形の適応形予測機構	12
2.4.1	状態方程式形のモデル	12
2.4.2	固定パラメータと適応形可変パラメータの関連	14
2.4.3	状態方程式形のモデルの安定性と追従性	14
2.4.4	雑音特性の導入による予測精度の向上	19
2.5	実施例ー神奈川県相模川水系への適用ー	19
2.6	結 言	20
第 3 章	取水量確保のための水力発電量制御	22
3.1	緒 言	22
3.2	従来の河川流下機構の検討	23
3.3	オンライン制御のための新しいモデル	27

3.3.1	一次遅れ特性による近似	27
3.3.2	放流実験による近似モデルの評価	30
3.4	水力発電量のオンライン制御	33
3.4.1	問題の数式化	33
3.4.2	現実に用いた制御方式	34
3.4.3	計算機シミュレーションによる制御評価	36
3.4.4	放流制御実験	38
3.5	適用上の諸問題	39
3.5.1	降雨がある場合の下流到達流量の予測	40
3.5.2	無降雨の場合の平均値的解析	41
3.5.3	長期運用, 日間運用との関係	43
3.6	結 言	44
第 4 章	逐次形推定法の応用と系雑音および観測雑音の分離機構	45
4.1	緒 言	45
4.2	逐次形推定法の適用と問題点	46
4.3	雑音特性の分離法	50
4.3.1	システムの記述	50
4.3.2	特性分離の基本式	51
4.3.3	数値例	54
4.4	実験結果	56
4.4.1	系固有雑音と観測雑音の分離	56
4.4.2	3種の雑音の分離	58
4.4.3	推定誤差に対する効果	59
4.5	結 言	60
第 5 章	相模川水系集中管理システムの運用	63
5.1	緒 言	63
5.2	多目的ダム of 総合運用方式	66
5.2.1	確保貯水量の算出	66
5.2.2	出水期制限水位	69

5.2.3	貯水池最適運用曲線	70
5.3	洪水時のダムゲート制御	73
5.3.1	単一ダムの洪水時運用曲線	73
5.3.2	最適バスのパラメータ解空間と流入量予測	75
5.3.3	ダムゲート開度の制御	79
5.3.4	連水系，複数ダム系への拡張	80
5.4	発電所運転計画の自動化と発電量制御	80
5.5	水系データの管理	82
5.6	結 言	84
第6章	結 論	85
謝 辞	87
参考文献	88
付録	相模川水系集中管理システム	
1.	まえがき	93
2.	システム設置の目的	93
3.	システムの構成	94
3.1	計測装置	95
3.2	伝送装置	95
3.3	通信制御装置	96
3.4	端末表示装置	97
3.5	中央計算機システム	98
4.	システムの運用	101
5.	むすび	103

第1章 緒 論

1.1 はじめに

河川，貯水池，水門，発電所などから構成される水系^{*}の運用は，最近，水資源の高度利用ならびに人為的な災害の防止の両面から重要視されている。

水系運用の問題は，古くから土木工学において，主として洪水防止という観点から種々の検討がなされてきた。豊かな水資源をもつ我が国において，ほとんどの貯水池は洪水の発生を未然に防止するという見地からの運用をその基本としてきている。さらに昭和20年代の後半から30年代にかけて，水力発電の有効利用を目的とする貯水池運用が，電力会社などを中心に数多く論じられ⁽¹⁾，現在においても水系運用の基底になっていることは論をまたない。

しかるに，昨今，地域によっては，工業の発展，集中化が著しく，大規模な臨海工業地域の増大，人口の急激な集中化をみるに至って，水需要が増大し，きわめて近い将来の水不足が緊急の問題として表面化している。これに対する新しい水資源の開拓の一つとして，ダム建設，導水路による流域の変更などが着々実行に移されているが，地域的な水資源には限界があり，その運用にきめ細かい配慮が必要とされるに至っている。

一方，このような水不足が表面化していない地域においても，ほとんどのダムは，治水，用水，発電という目的をもつ，いわゆる多目的ダムの性格をもっている。しかも水系はますます複合化されており，その運用の高度化が要求されてきていると云えよう。したがって水系の運用に当っては，従来からの慣習的な運用や，必要に応じた局所的な検討による操作規則による運用ではなく，より総合的な観点から水系の運用を検討しなければならない時期にきている。

本論文は，このような要求に対して，現実の水系を一つのプロセスと考え，テレメータシステムおよび電子計算機を利用して，既設の土工施設をもつ水系を管理，運用，制御する方式について検討したものである。

1.2 制御対象と制御目的

貯水池を中心に，大小の河川からなるシステムを水系と呼ぶ。水力発電施設，調整池，水門などがこの系に含まれる。一般に，ダムは一水系に複数個存在し，

^{*}本文中で用いている水系という言葉は，通常土木工学で用いられている用語よりはせまい意味で用いている。

貯水池が連水系をなすもの、合流する河川のそれぞれ上流に位置するものなど様々な形態をとっている。

貯水池に流入する流量の多くは降雨に起因する。降雨量は、流域内に配置されたロボット雨量計、あるいは、地域的なレーダ雨量計*で計測される。また流入量は貯水池の水位変化と放流量とから計測される。

ダム下流域に対する水供給は、通常、水力発電所を通しての河川放流によっておこなわれる。したがって、ダム下流の河川は、平常時には取水用配水路の働かしをし、一方、台風などによる集中豪雨などによる大規模な出水がある場合には放水路となる。下流取水地点には、小容量の調整池があるのが普通である。

下流支川のなかには、上流にダムをもたず、したがって、制御されない自然流量の増減がある小河川があるが、近年、これらの支川上流にもダム建設が計画される傾向にある。

水系の運用は、このような水資源システムのなかで、人為的に制御可能な、ダム放流量制御、水力発電量制御ならびに各種水門の操作の問題であると考えることができる。しかもこれら個々の制御機構の問題というよりも、それらを総合し、同一の目的のために統合管理することと定義づけられる。

制御目的は水系によって異なるが、一般に、多目的ダムでは次の三つの目的をもっている。

- (1) 水エネルギーの高効率運用
- (2) 洪水調節
- (3) 取水の確保ならびに無効放流の低減

従来、水系の運用は、主として(1)項の発電という立場から論じられ、取り扱い時間領域も日単位の日間運用、旬または月単位の長期運用として巨視的に論じられてきているが、本文では、(2)、(3)項の目的を中心に、時間単位の実時間制御方式について検討している。

1.3 水系制御の問題点

自然現象を対象とする水系制御を考えるにあたって、次のようなプロセス制

*レーダ雨量計は、建設省を中心に、未だ実験段階にあるが、近い将来、有力な降雨量観測計として実用化されるものと思われる。

御の一般的課題に直面する。

(1) 対象のモデル化の問題

自然現象をどのように単純に、しかも精度よくモデル化することができるか。古くから研究されてきている土木工学的な理論や実験式を、オンライン制御に利用しようとする場合にどのような問題が存在するか。

(2) 状態量の推定と予測の問題

観測値には種々の雑音が含まれている。これらをどのように取り扱うべきか。

(3) 意志決定の問題

貯水池運用の問題は、不確定な情報にもとづく意志決定の問題ともみることができる。現実にはどのような方策がとられるべきであろうか。

(4) 経験の蓄積と活用

河川は、十年一日のごとく流れている。刻々収集されるデータをどのように蓄積し、活用すべきであろうか。

1.4 研究内容の梗概

以上においては、水系制御の目的ならびに対象に関して、一般的な記述を試み、問題を提起した。

第2章においては、水系制御の基本となる河川流出予測について論じている。これは水系の諸特性のなかで、降雨から流出にいたるプロセスをとりあげ、流出予測という観点からモデル化の問題を検討したものである。この問題に関しては、古くから土木工学において数多くのモデルが提案されているが、いずれも有限個の固定された定数を含む数式によって複雑な自然現象を近似するという試みであり、必ずしも実時間制御のためのモデルには適していない。そこで、観測値にもとづく適応形の新しいモデルを開発し、実河川データにもとづいて、モデルの特性を安定性、追従性の諸面から検討した。

第3章においては、ダム放流の伝播特性を河川流下機構として論じ、合せて、取水量確保のための水力発電量制御について検討している。これは、昨今の水需要増大にもなまって表面化された水確保という目的からの無効放流最小の放流量制御の問題を取り扱っている。

システムを可変パラメータを含む線形一次系としてとらえ、雑音を含むプロ

セスの制御問題として記述し、状態量の推定、パラメータの同定、さらに最適操作量の決定という手順で解を得ている。厳密な意味での最適解ではないが、この方式の妥当性を誤差吸収能力を有する取水調整池の容量という形で評価している。

さらに、現実に応用するにあたっての諸問題を検討し、実河川における放流制御実験結果について述べている。

第4章においては、河川プロセスの制御を、一般的な雑音を含むプロセスの問題に拡張し、状態量の推定、パラメータの同定などの問題について検討している。特に、新しく雑音特性分離機構を開発し、雑音特性の定量的な把握が、これらの問題の解決に意義をもつことを、計算機シミュレーションによって示している。

第5章においては、本論文展開の背景となった相模川水系集中管理システムの運用に関して検討した諸問題を記述している。特に、従来、主として電力利用の立場から検討されてきた貯水池運用問題を、多目的ダム総合運用という観点から整理し、その検討結果を記述している。また、洪水時のゲート制御問題を意志決定と階層的制御の問題として取り扱い、現在実施している方式について詳しく記述している。

さらに、相模川水系集中管理システムにおける水力発電計画の自動化と平常時の水力発電制御の問題、ならびに定時データ収集にもとづく水系データの管理について、簡単に記述している。

最後に、電子計算機を中心とする水系集中管理システムについて、その構成ならびにシステム設計上考慮したいいくつかの問題を参考として付録に記述している。

第2章 水系オンライン制御のための 適応形流出予測機構

2.1 緒言

水系制御をおこなうにあたって、最も基本的な問題は、水系の特性を完全に把握することにある。本章では、まず、水系諸特性のなかで、降雨から流出に至るプロセスをとりあげ、水系制御において最も必要度の高い流出予測という観点からモデル化の問題を検討する。

水系オンライン制御のための予測には、予測期間が短かくても十分高い精度がえられることが要求されるので、従来の実験式などによる固定形モデルでは十分でなく、観測値にもとづくいわゆる適応形のモデルの開発が必要になる。

これまでにこの形の予測機構について深く検討した例がないので

(1) 線形係数群による予測機構

(2) 状態方程式形の予測機構

を設定し、実際の河川のデータにもとづいて、適応形モデルにした場合の可変パラメータの安定性、追従性について検討した。

その結果、実規模の実験においても充分実用に供しえる予測機構を開発した。^{(13), (35)}
これは現在、神奈川県相模川水系において、出水予測に用いられているが、本文の方法および特性はきわめて一般的なものであり、他の河川水系においても同様にあてはめることができるものとする。

2.2 河川流出予測機構の設定とそれにもなう問題点

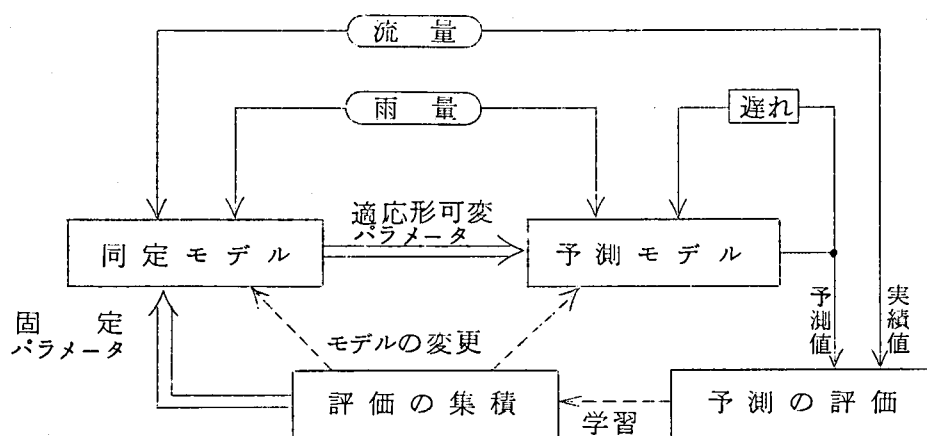
予測機構の最も望ましい形は、予測の対象、目的、利用できる情報、予測の評価などの種々の要因によって定まるが、水系オンライン制御を目的とした最適な予測機構を求めるためには、下記の事項を考えなければならない。

2.2.1 予測機構の構造および形

地域的な広がりをもつ河川流出の構造には、初期に降った雨と終期に降った雨とでは流出の仕方が違うというような非線形的性質がある。また同じパターンの降雨に対しても、雨ごとに流出のパターンが変化するという非定常的性質を有している。このような複雑な系を何か一つの数学モデルで表現し、実用

に供しようとする努力がこれまでになされており，ユニットハイドログラフ法⁽²⁾，貯留関数法^{(6),(7)}など優れた多くの提案がなされてきているが，いずれもダム設計の高水位計算とか，大まかな予測のためのモデルであり，きめ細かい予測の目的には適していない。

そこで，河川流出のプロセスを時々刻々変化する動的なものとして把握し，パラメータを状況の変化に応じて変化させるという，いわゆる適応形のモデルを設定する。第 2.1 図は，このモデルの概念図を示している。

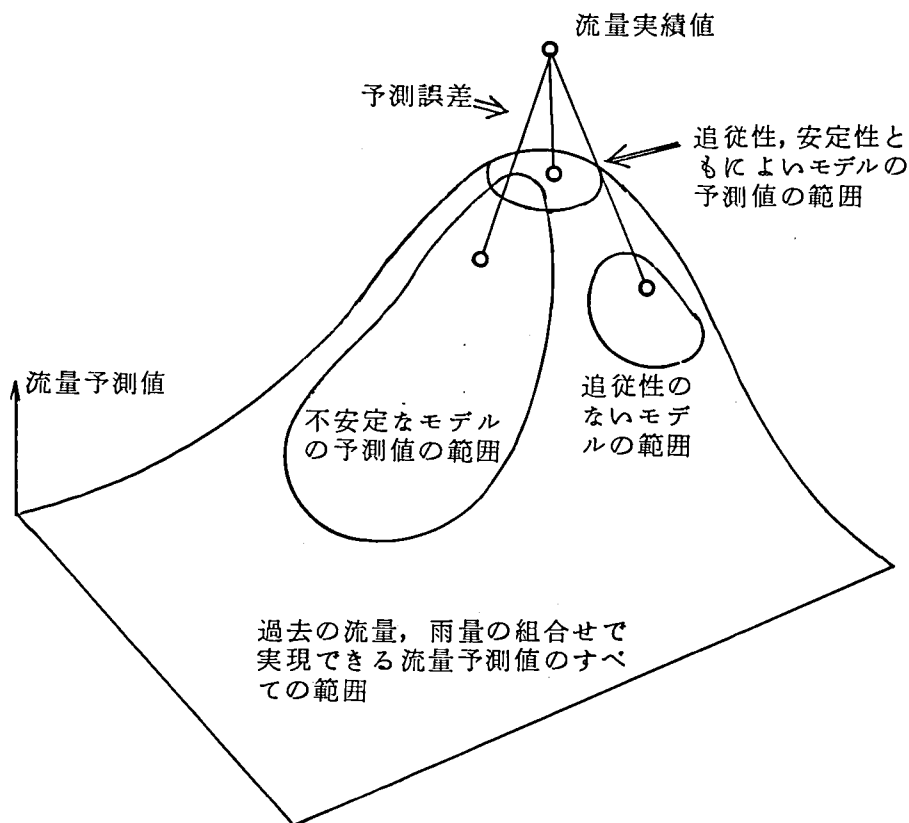


第 2.1 図 適応形予測モデルの概念図

すなわち，モデルは観測される降雨量と流出量によって系のパラメータを推定する同定モデルと，推定されたパラメータによって予測をおこなう予測モデルから構成されている。

降雨から流出に至るプロセスを適確に表現するモデルを追求することが本文の主眼となる点であるが，これを究極的に見出すことはほとんど不可能なので，できるだけそれに近い形のものを安定性，追従性の点から検討した。第 2.2 図は，過去の降雨量，流出量の組合せで実現できる流出予測のいくつかのモデルの中で，状況の変化に対する追従性と安定性をそなえた予測モデルを見つけようとする本文の位置づけを示している。

最も望ましい予測の機構としては，学習機能をもたせ，時を追うに従って次第により良いモデルに切り換えていくという構造が考えられるが，本文ではこ



第 2.2 図 予測機構の安定性と追従性

の点までの議論はおこなっていない。

2.2.2 予測期間と予測評価

理想的な予測モデルが存在し、非常に長い将来まで精度よく予測できるならば、予測期間、許容誤差などの問題はないが、本文では適応形の予測機構を想定しているので、パラメータの追従性、安定性の評価のために、要求される予測期間、許容誤差を見きわめておくことが重要である。

水系オンライン制御において必要な予測期間は水系の形によっても異なるが、流下時間遅れ、ダムゲート操作の時間などを合せたものがそれにあたる。また許容誤差は調整池において予測の結果行なった操作のずれを吸収できる範囲であり、調整池の調整能力に負うところ大である。

次に予測の評価であるが、モデルのパラメータを推定する過程では、予測過程においてどのくらいの予測誤差が発生するかを考慮した基準によってパラメータの同定をおこなうことはできないから、現時点までに得られた情報にもとづいて、たとえば現象とモデルとのずれの自乗平均最小というような基準によってパラメータの推定がおこなわれるが、予測過程においては、あくまで予測誤差を許容範囲におさえることが問題とされるべきであるので、予測モデルの評価として、

$$IP = \frac{1}{t_n - t_0} \int_{t_0}^{t_n} \left[\frac{1}{\int_t^{t+\tau} Q(\lambda) d\lambda} \int_t^{t+\tau} \{Q^*(\lambda) - Q(\lambda)\} d\lambda \right]^2 dt \quad (2.1)$$

を設定して使用している。ここに、 $Q(\lambda)$ は時刻 λ における流出量実績値、 $Q^*(\lambda)$ は流出量予測値、 $t_0 \sim t_n$ は考慮している時間範囲、 τ は予測時間である。

河川水系の特質として、短い時間での正（過剰）、負（不足）の操作誤差は、調整池などにより相殺される性質があるので、 τ 時間先までの予測誤差を単純平均したものを、その時点における予測誤差平均値とし、それを考察する全期間にわたってさらに自乗平均したものを総合的な予測評価としている。これは通常利用される誤差自乗平均の評価をさらに現実的な形に近づけたものと考えている。

2.2.3 代表雨量，河川流量の観測

予測機構の入力となる雨量は、流域内のいくつかの主要箇所ではロボット雨量計により観測されるが、各地点の雨量の相関は相当大きく、別個の独立な情報源として利用することは相互の干渉があり効果的ではない。本文では、これまでも多く利用されているティーセン法によって、重みづけ平均の形で代表雨量を決定し、流量を出力とする一入力、一出力の予測機構について検討している。

雨量計の観測誤差は雨量計の形式によっても異なるが転倒マス型ロボット雨量計の場合には、ほぼ一様分布に従うものと考えられる。また、同定過程に必要な流量実績値は、ダムゲート開度、発電量、貯水池の水位変化などの観測値から逆算されるが、この観測誤差は場合によっては非常に大きく、河川水位の観測から流量を算出する場合には特に誤差が大きくなる。これらの誤差は、予測機構の精度に大きな影響を与えるものと考えられるが、ここではこの点の検討はおこなっていない。流量は十分よい精度で観測できるものとして議論をす

すめる。

2.3 線形係数群による適応形予測機構

流出量はすべて降雨に起因するものと考え、それまでに降った雨量の線形結合であたえられるものと仮定すると、

$$Q(t) = \int_{-\infty}^t G(t, \tau) R(t - \tau) d\tau \quad (2.2)$$

のように、流出量 $Q(t)$ を過去の雨量 $R(t - \tau)$ の重みづけ平均の形で表現できる。このときの重み関数 $G(t, \tau)$ はユニットハイドログラフ、すなわち、衝撃的な雨量に対する流量の変化を示すものであるが、現実の河川ではこの関数は時間とともに変化していく。

(2.2) 式を離散的な形で表現すると n 時点の流出量は

$$Q_n = \sum_{i=1}^{\infty} g_i R_{n-i} \quad (2.3)$$

の形になる。本節ではまず第一段階としてこの形のいわゆる線形係数群のモデルを採用したときの特性について検討する。

2.3.1 同定モデルと予測モデル

(2.3) 式に示したモデルには、係数群 $g_i (i=1, 2, \dots, \infty)$ は無限個あり、これを有限個で打ちきるかわりに、それまでの過去の雨量の情報をもつ過去の流量を変数にとることを考えた。また、河川には降雨がなくても基底流量があり、これを考慮して、

$$Q_n = Q_B + \sum_{i=1}^N a_i R_{n-i} + \sum_{j=1}^M b_j Q_{n-j} + \epsilon_n \quad (2.4)$$

の形で表現できるものとした。ここに、 Q_B は基底流量、 a_i, b_j はそれぞれ重み係数をあらわし、 N, M はその係数群の個数、 ϵ_n は近似誤差を示している。

係数群 $\{a_i\}, \{b_j\}$ は一定期間の観測値にもとづいて誤差の自乗和 $\overline{\epsilon_n^2}$ が最小になるように選ぶものとするが、そのパラメータ同定の過程で用いるデータブロック数は、係数群の安定性と追従性に密接な関係があるので、次節にのべることにする。

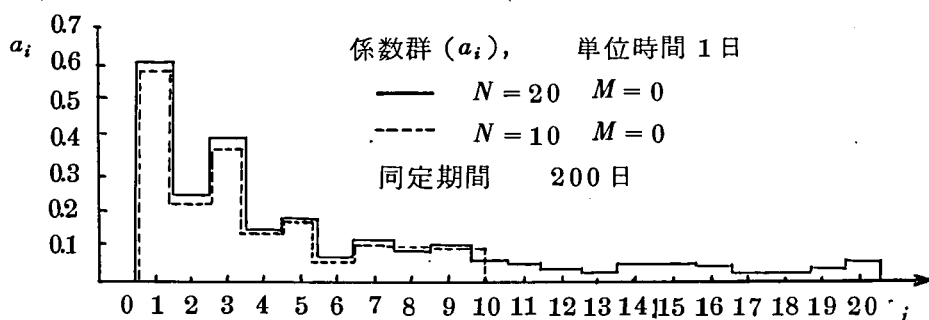
$\{a_i\}, \{b_j\}$ がきまると、それによって一単位時間先の Q_{n+1} を予測し、順次、くりかえして τ 時間先までの予測をおこなう。この予測過程からわかるよ

*以下において、流出量，流入量，放流量は，全て流出流量，流入流量，放流量であり，単位時間におけるものとして用いている。

うに、 τ が長くなれば予測の誤差が集積し、予測精度は低下してくる。

2.3.2 線形係数群の個数

現在の流量にそれ以前の降雨がどの程度影響しているかをおおまかに調べるために、一日先の流量を、過去 20 日間の雨量から予測する線形モデルについて検討した。その係数群を一年間にわたるデータから同定したところ、第 2.3 図のような結果を得た。



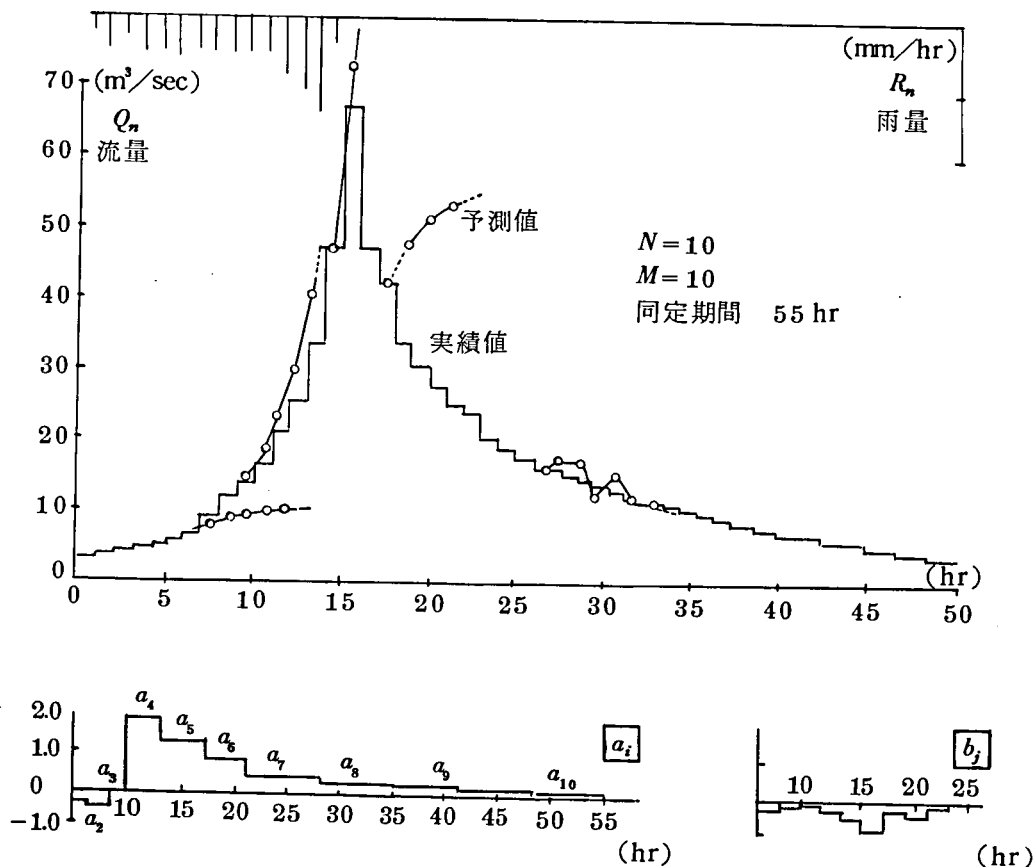
第 2.3 図 線形係数群の例

これをみても明らかなように、対象とした河川では、流量変化に影響をもつのは過去 3 日間あまりの雨量であり、それ以前の情報は何らかの形にまとめることができることを示している。したがって時間単位に数時間先を予測する場合には、50~70 時間前までの雨量を考慮すればよいことがわかる。しかし、過去の雨量の一時間ごとに一つの係数を割りあてたのでは、係数の数がふえ、同定にほう大な時間を要するので、過去にいくほどデータブロックをまとめるというようにして、係数の総数を大巾にへらして特性を調べた。

2.3.3 線形係数群によるモデルの安定性と追従性

線形係数群によるモデルを利用して、新しい観測値を得るごとに、係数群を同定し、流出予測をおこなったときの数値例を第 2.4 図に示した。これを見ると、

- (1) 流出量の増加の少ない初期、すなわち雨の降りはじめには、予測値が実績値を下回る傾向にある。
- (2) 流出量の立上りの部分では比較的よい結果がえられる。



第 2.4 図 線形係数群モデルの予測例

(3) 尖頭値附近では、非常に不安定である。

といった特性があるが、尖頭値附近では係数群の同定が系の変化においつかず、不安定な特性を示すものと考えられる。

このモデルでは、安定な予測をおこなおうとすれば追従性がわるく精度が落ち、変化に追従させようとすれば不安定な部分がさけがたい。これは、同定しなければならない係数が多いことと、線形近似だけでは現象のモデル化が十分でないことに原因があるものと思われる。

適応形モデルの条件としては、いかなる状態であっても系の変化に追いつくことが要求されるので、この形のモデルは、本論文の目的にはあまり向かないことになるが、いわゆるハイドログラフ形のモデルの代表として、次節以下のモデルとの比較のために、その特性を調べた。線形係数群によるモデルは、実

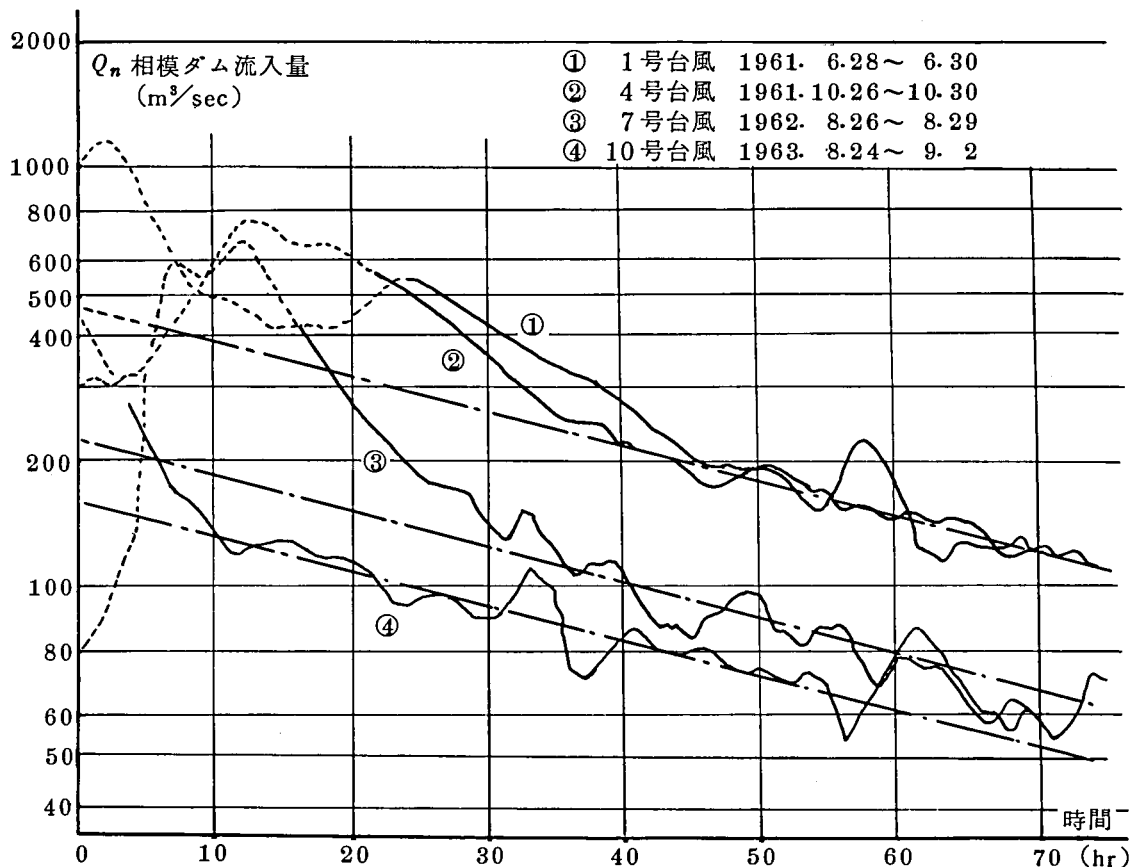
用に供しえなかったが、河川流出機構の大まかな性質を得るための基礎実験として役立った。⁽¹²⁾

2.4 状態方程式形の適応形予測機構

前節で述べたように、パラメータの数の多いモデルは状態の変化に追いつかないため不安定になるので、本節では、河川の物理的な性質を若干利用し、パラメータを極力少なくした予測機構を考える。

2.4.1 状態方程式形のモデル

洪水の出水の降雨が終了したあとの流出量の減衰していく様子を第 2.5 図に示すが、これをみると、いずれの洪水も一定の減衰率で減衰する部分のあることに気づく。また、その減衰特性は 1 種ではないが、たかだか 2 種あるいは 3



第 2.5 図 降雨後の流出量の減衰特性

種のものが合成されたものとみなすことができる。

そこで3種の状態量 x_n^1 , x_n^2 , x_n^3 を考え, x_n^1 は雨量 R_n の一次遅れを, x_n^2 は二次遅れを, x_n^3 は三次遅れの状態量を示すものとする, 各状態量の時間的な遷移は, 指数平滑法⁽⁸⁾の表現によれば,

$$\begin{bmatrix} x_n^1 \\ x_n^2 \\ x_n^3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-\alpha & 0 & 0 \\ \beta & 1-\beta & 0 \\ 0 & r & 1-r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{n-1}^1 \\ x_{n-1}^2 \\ x_{n-1}^3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \alpha \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} R_{n-1} \quad (2.5)$$

であらわされる。ここに, α, β, r は減衰をあたえる定数であり, 正規化して $0 \leq \alpha, \beta, r \leq 1$ の性質をもつものとする。

実際の流出量 Q_n は, これら3種の状態量が線形結合されて流出したものとみなして,

$$Q_n = [G_n^1 \ G_n^2 \ G_n^3] \begin{bmatrix} x_n^1 \\ x_n^2 \\ x_n^3 \end{bmatrix} + \epsilon_n \quad (2.6)$$

の形であらわす。これは流出量が, 水系の貯留効果をあらわす状態量 x_n^1, x_n^2, x_n^3 の貯留状態によってあたえられると考えていることになる。ここで ϵ_n はこれらの表現ではあらわすことができない誤差分である。また, G_n^1, G_n^2, G_n^3 はどのような割合で雨量貯留量が表面流出になるかを与える係数であるが, これらは, 水系の状況によって非定常的性質をもつものとする。

(2.5)式における R_n は, 実際の降雨量 r_n を

$$R_n = r_n \cdot k(r_n) \quad (2.7)$$

$$r_n = (1-\delta)r_{n-1} + r_n \quad (2.8)$$

のような非線形変換したものを用いる。これは降雨の初期には流出がそれほど増加をみないという性質をあたえるものであり, 実効雨量という考え方を導入したものである。(2.7)式の $k(r_n)$ は, (2.8)式であたえられる減衰性をもつ累計雨量 r_n によって定まる実効雨量係数であり, 一般には河川固有の飽和特性であたえられることが知られているが, 本文では二個のパラメータをもつ単純化した飽和特性でおきかえている。 δ は, 累計雨量の効果が減衰することをあらわす定数である。

このようなモデルにおいて, 定めなければならないパラメータは, $\alpha, \beta, r,$

G_n^1, G_n^2, G_n^3 ならびに非線形特性に含まれるパラメータであるが、流出量の減衰特性はほぼ同一の特性をもつので、 α, β, r は一度定めればそれほど大きな変動はないものと考えられる。そこで予測にはいる準備の段階で、いくつかの過去の雨量、流量の関係から、その河川に特有の α, β, r を、あらかじめ前述した予測の評価基準によって、山登り法などで算出しておき、これを固定パラメータとして取り扱うことにする。また、非線形特性は、一出水に対して時間とともに変化するという性質のものではなく、あらかじめ平均的な特性を設定しておくものとした。したがって本文のモデルでは、 G_n^1, G_n^2, G_n^3 だけを適応形のパラメータと考えている。

2.4.2 固定パラメータと適応形可変パラメータの関連

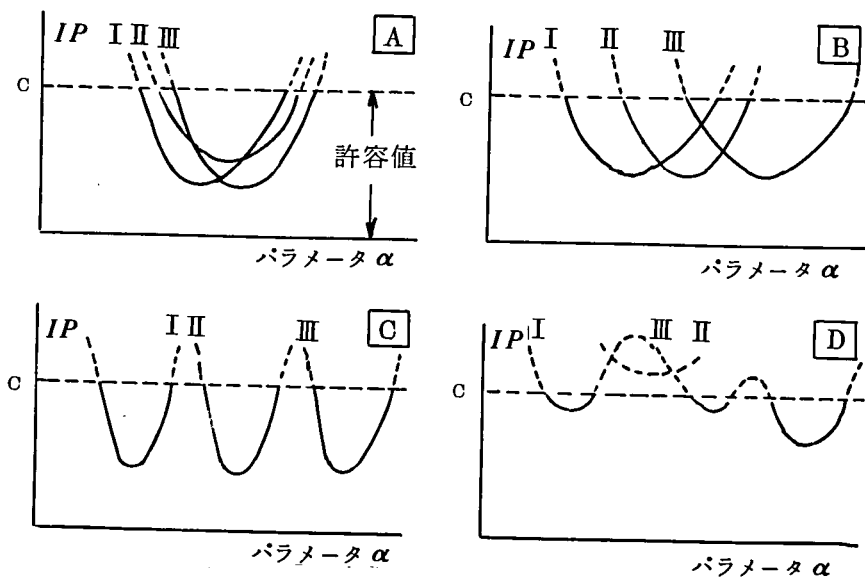
一般に、現象をモデル化して予測をおこなうとき、系に含まれるすべてのパラメータを時々刻々変化させていくことは、2.3節でも述べたように、望ましくない。それでは、パラメータのうち、どの部分を固定にし、どの部分を可変形にするかは重要な問題であり、予測機構のよさもこの選び方で決まるといって過言ではない。

固定パラメータの実験的な選定の方法として、第2.6図のように、パラメータの変化による予測誤差の変化を調べ、その特性を見わけた。たとえば、A図はモデルが系の特性によく適合していることを示している。B図はモデルの特性は系の特性に適合しているが、系の変化があり、さらに良い適合をえるためには可変形のパラメータが必要なことを示している。全体のパラメータが多すぎると、C図に示すような特性になりがちである。また系の変化が激しく、モデルの選び方が悪いときにも、これに似た特性があらわれる。D図はモデルが系の特性に適合しないときで、このようなときにはモデルをつくりかえる必要がある。

2.4.3 状態方程式形モデルの安定性と追従性

2.4.1で述べた状態方程式形のモデルにおいて、(2.6)式における G_n^1, G_n^2, G_n^3 を状況の変化に適応する可変パラメータと考え、3種の可変パラメータのなかで、自由度を1とするI型モデル

$$Q_n = \begin{bmatrix} 0 & G_n & G_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n^1 \\ x_n^2 \\ x_n^3 \end{bmatrix} + \epsilon_n \quad (2.9)$$



IP : 予測の評価 α : パラメータ

C : 予測誤差の許容限界値

I, II, III : いろいろな実際のケース

第 2.6 図 パラメータの選定

と、自由度を 2 とする II 型モデル

$$Q_n = \begin{bmatrix} 0 & G_n^2 & G_n^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n^1 \\ x_n^2 \\ x_n^3 \end{bmatrix} + \epsilon_n \quad (2.10)$$

についてその特性を検討した。ここに、(2.9) 式における G_n は (2.6) 式において $G_n^1 = 0$, $G_n^2 = G_n^3 = G_n$ とおいたものであり、(2.10) 式は $G_n^1 = 0$ としたものである。実際の河川では降雨後すぐに流量が増加することは考えられないので、降雨の一次遅れをあらわす状態量 x_n^1 の係数 G_n^1 をいずれも 0 としている。

G_n , G_n^2 , G_n^3 は、水系の状況に変化が生じ、状態 x_n^1 , x_n^2 , x_n^3 の組合せが水系に適合しなくなってくると、同定期間内の誤差自乗和が最小になるよう、たとえば I 型モデルの場合、

$$G_n = \frac{\sum_{i=1}^N Q_{n-i+1} (x_{n-i+1}^2 + x_{n-i+1}^3)}{\sum_{i=1}^N (x_{n-i+1}^2 + x_{n-i+1}^3)^2} \quad (2.11)$$

などの形で、新しい観測値を得るたびに定められていく。また、Ⅱ型モデルの場合には、 N 個の同定期間内の観測データを用いて、最小自乗法により、

$$G_n^2 = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^N (x_{n-i+1}^3)^2 \sum_{i=1}^N x_{n-i+1}^2 Q_{n-i+1} \right\} - \left\{ \sum_{i=1}^N x_{n-i+1}^2 x_{n-i+1}^3 \cdot \sum_{i=1}^N x_{n-i+1}^3 Q_{n-i+1} \right\}}{\sum_{i=1}^N (x_{n-i+1}^2)^2 \sum_{i=1}^N (x_{n-i+1}^3)^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_{n-i+1}^2 x_{n-i+1}^3 \right)^2} \quad (2.12)$$

$$G_n^3 = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^N (x_{n-i+1}^2)^2 \sum_{i=1}^N x_{n-i+1}^3 Q_{n-i+1} \right\} - \left\{ \sum_{i=1}^N x_{n-i+1}^2 x_{n-i+1}^3 \cdot \sum_{i=1}^N x_{n-i+1}^3 Q_{n-i+1} \right\}}{\sum_{i=1}^N (x_{n-i+1}^2)^2 \sum_{i=1}^N (x_{n-i+1}^3)^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_{n-i+1}^2 x_{n-i+1}^3 \right)^2} \quad (2.13)$$

のようにして、 G_n^2 、 G_n^3 が求められる。

このようにして定められたパラメータが、将来短期間ではその変化がないものとして、 τ 時間先まで、(2.5)、(2.9)あるいは(2.10)式を利用して予測し、その予測誤差ならびにパラメータの変化を実測データにもとづいて検討した。

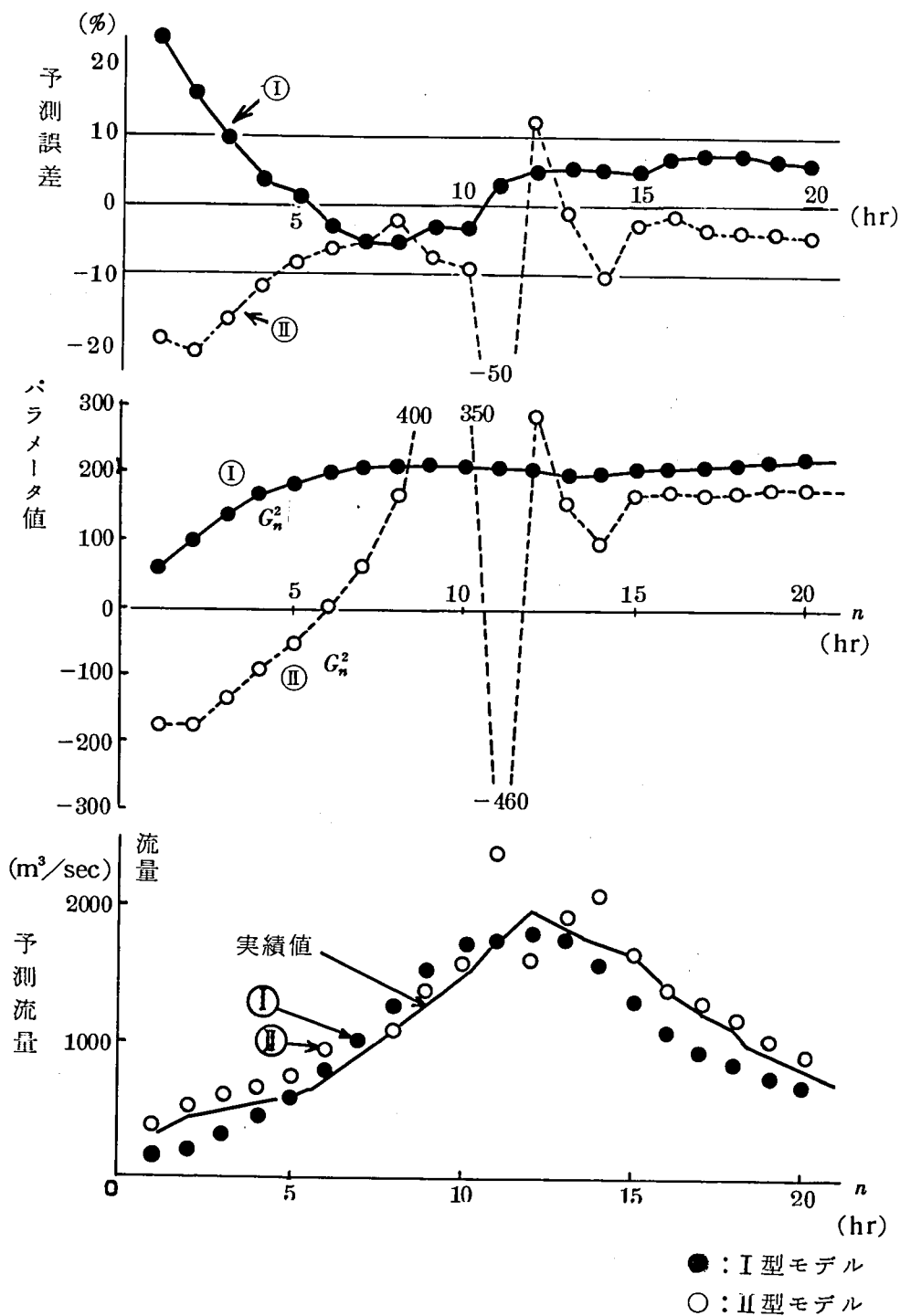
第 2.7 図は、同一出水波形に対するⅠ型モデルおよびⅡ型モデルの予測誤差、パラメータの変化、ならびに 6 時間先の予測値を示す計算結果の一例である。図から明らかなように、可変パラメータを増加させても、よい結果がえられないことがわかる。予測誤差はⅡ型モデルにおいて部分的によくなることもあるが、逆に非常に悪くなる部分が存在する。

また、パラメータの変化は、Ⅰ型モデルが比較的ゆるやかであるのに対し、Ⅱ型モデルでは振動的な特性があらわれて安定性がきわめて悪い。これらから、適応形のモデルとしては、(2.9)式を用いたⅠ型モデルがすぐれていると云える。

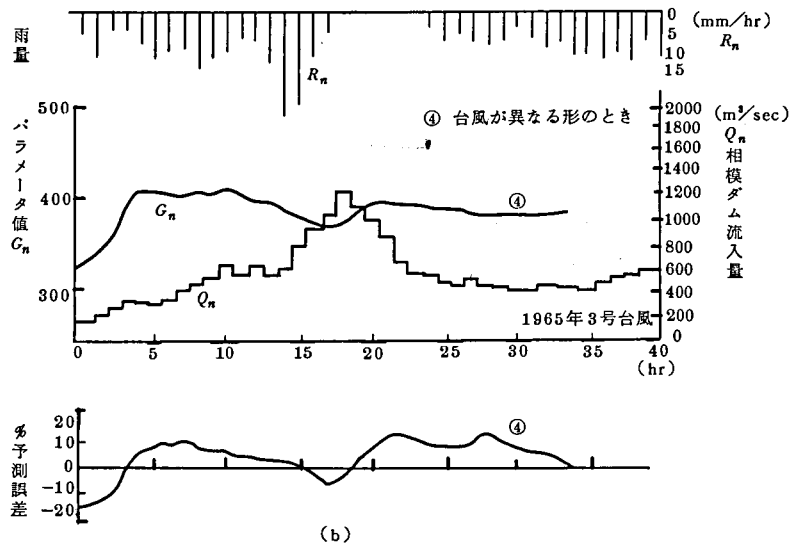
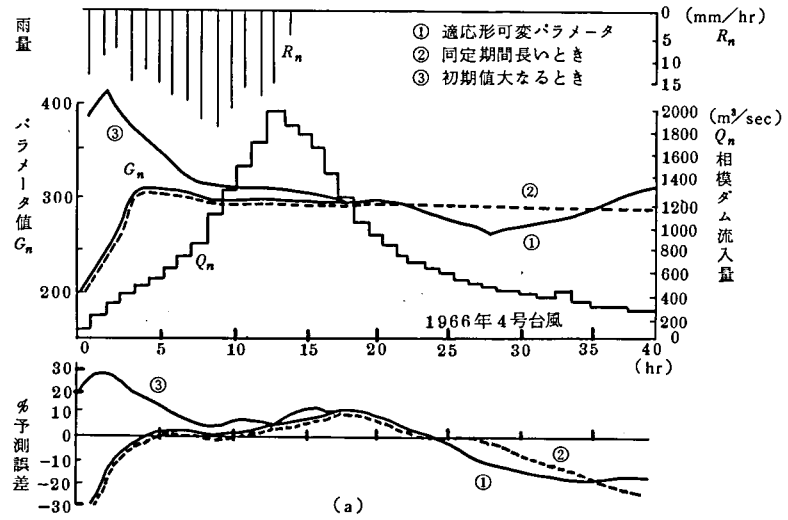
次に、適応形可変パラメータの追従性を調べるためⅠ型モデルについて G_n の時間的变化を調べた。その結果次のことが明らかになった。(第 2.8 図)

(1) 初期の予測誤差は大きい、 G_n の自己調整によりすぐ回復する。

(追従性)



第 2.7 図 適応形可変パラメータ 6 時間先の予測特性



第 2.8 図 適応形可変パラメータ G_n の特性

- (2) パラメータの変化はゆるやかである。(安定性)
- (3) パラメータの決定のための期間を長くすると安定性はよくなるが誤差改善が遅くなる。すなわち追従性がわるくなる。
- (4) G_n の初期条件の与え方を変えても、安定した特性が得られる。

このような諸点からみて、本文で述べたモデルは、適応形モデルとして非常にすぐれた特性を有していることがわかる。現在、このモデルは水系オンライン制御のための予測機構として実際の操作運用に供している。

なお、数値例は洪水性降雨をあつかっているが、本方式を一般の降雨時に適用しても十分良好な結果が得られている。本方式の融雪に関連した適用はまだ行っていない。

2.4.4 雑音特性の導入による予測精度の向上

前節までに述べてきた方法には、水系固有の雑音特性および観測にともなう雑音特性の考慮がなされていない。しかし、これらの雑音特性がなんらかの方法で把握できるならば、さらに予測精度は向上するものと思われる。

雑音特性を考慮した諸問題については、以下の章で詳しく検討する予定であるが、本章では、実用上、観測値をそのまま用いたモデルにより、流出予測をおこなった場合の諸特性を検討した。また、本章の予測機構とダムゲート制御、発電放流量制御との関連については、章をあらためて検討する。

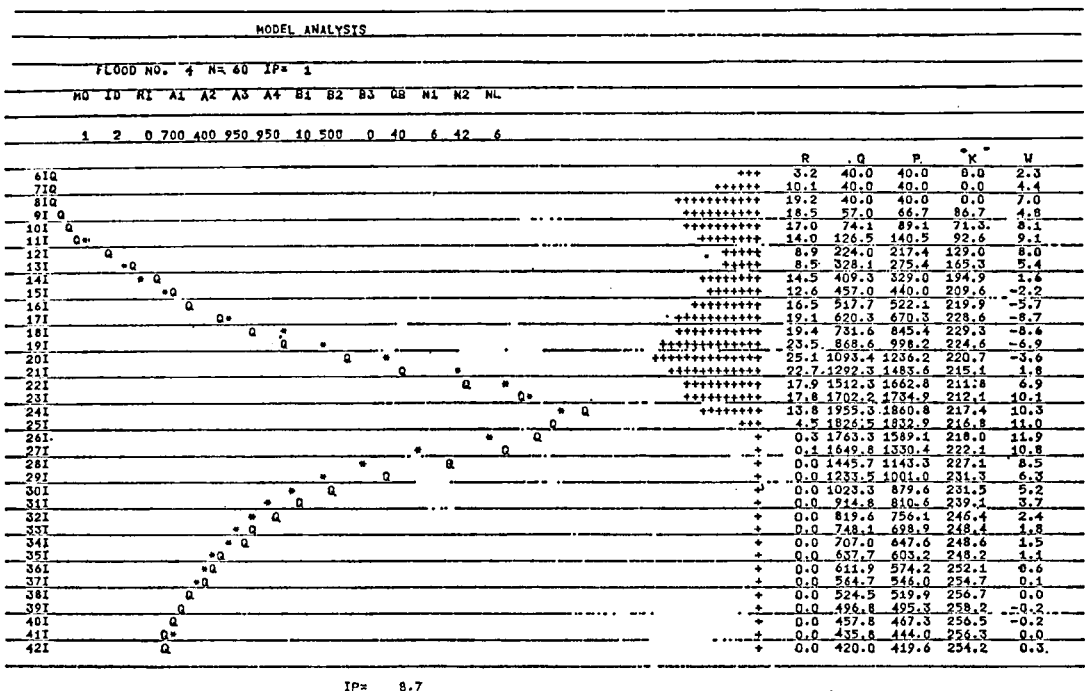
2.5 実施例 — 神奈川県相模川水系への適用 —

本章で開発した適応形流出予測機構は、神奈川県相模川水系の相模ダム流入量ならびに中津川下流流量観測データにもとづき、約30ケースの大小さまざまな出水波形に適用したが、予測誤差平均（(2.1)式）10%という目標をほとんど満足し、現在、プログラム化されて実用中である。

第2.9図は、2時間先の予測値を実測値と同時に示した一例である。これは、いわゆる波形内挿法による結果ではなく、オンライン予測をシミュレーションによりくりかえしたものである。

オンライン制御を目的とした予測では、流量の立上り部分およびピーク値附近の予測が重要であるが、この部分の特性は比較的良好である。またピーク値をすぎた部分では、予測値がずれてくる傾向に対して、時間の推移とともにこれを改善しようとする働きが現われてくることがわかる。

図において、 W は各時点での6時間予測誤差の流入量に対する割合を示しているが、いずれも10%内外、あるいはそれ以下であり、可変パラメータの値（図中 K ）の変化はゆるやかである。



Q : 流量観測値 (m^3/s), P : 流量予測値 (m^3/s), R : 雨量観測値 (mm/h)
 K : 適応形可変パラメータ G_n , W : 6時間予測の各時点における誤差 (%)
 IP : Wの自乗平均値 (%), * : Pをプロットしたもの, + : Rをプロットしたもの

第 2.9 図 実施例 (1966 年 4 号台風)

2.6 結言

本章では、水系オンライン制御のために、いくつかの予測機構を想定し、実際の河川資料によりその特性を検討した。主要な結論は次の通りである。

(1) これまでの河川流出予測機構は固定形のもので大まかな予測にはよいが、比較的短時間 (5~10 hr) のきめ細かい予測には適さない。この種の予測をするためには可変形のパラメータを導入する必要がある。

(2) 線形係数群による予測機構は、これまでのユニットハイドログラフ法を離散形に直したものであるが、パラメータの数が多いので、同定に時間を要するばかりでなく、安定性と追従性の点から実用に供しえないことが確認された。

(3) 状態方程式形の予測機構は、水系の現象的な特性を加味したものであり、河の特性によってきまる固定パラメータと、時々刻々系の状況の変化に追従す

る可変パラメータをもつ半固定，半可変形のモデルであるが，パラメータの選定が適切であれば，安定性，追従性ともすぐれた特性を示す。

第3章 取水確保のための水力発電量制御

3.1 緒言

従来、水系の運用は、平常時には水力発電を、洪水時には洪水調節を中心に考えられてきた。しかし、最近、地域によっては、ますます著しくなってきた都市の人口集中に起因する水道用水の需要増加、ならびに工業の発展にともなう工業用水の増加などにより、水そのものに対する需要が高まっている。

したがって、貯水池は、発電、治水以外に、豊水期にはその貯水能力を利用して水量を貯え、降雨が少ない渇水期には自然流入量だけではまかないきれない水需要をダム放流によって満たすという役割が特に重要視されるようになっていく。しかもその放流は、水資源を有効に利用するために、水需要に必要なかつ十分な量だけを満たすようにきめ細かく制御し、無効放流をできるだけ少なくするというまでに至っている。

一般に、水需要確保のための貯水池は、広域におよぶ山岳地帯からの各支川を集めて、水系の中心部に位置し、水需要源はダム下流の里側に広がっている。そして水需要に対する貯水池からの供給は、直接大口径のバイプラインで送られるものもあるが、多くはダム下流の河川に水力発電機を通して放流され、河川下流の取水調整池で再び取水される。

このような水系において、水需要を必要十分に満たし、しかも河口へ流れ去る無効放流を最小にするようなダム放流量制御あるいは水力発電量制御を考える場合には、河川流下機構の解明と、各種の制約のもとでの放流量制御の方式の設定が必要になる。

本章では、このような背景をもつ水系の水力発電所の発電量制御について検討する。⁽⁸¹⁾

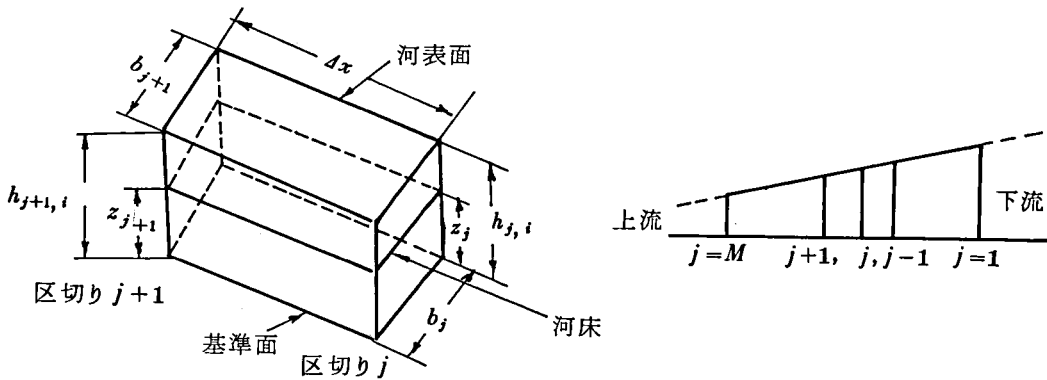
ダム放流の伝播については、土木工学において、古くから洪水伝播の問題として検討されてきているが、これらの機構をオンライン制御に利用する立場から検討し、より簡単で十分目的を達成できる新しいモデルを開発した。さらに、それを用いて、無効放流最小を目的とする水力発電量の制御方式を検討し、現実に利用できるいくつかの方式を開発した。

本文は、神奈川県相模川水系津久井発電所において、放流実験を行なった結

果を中心に展開されているが、目的を同じくする他の河川についてもあてはまるものと考えている。ここ数年を目標に、東南アジアにおける灌漑用水確保のための貯水池制御方式が世界的な規模で計画されている⁽³⁹⁾が、これらも目的を同じくする計画である。

3.2 従来の河川流下機構の検討

貯水池から放流された水が下流にどのように伝播するかという問題は、古くから水理学において研究されている^{(8),(4)}。たとえば、第 3.1 図のような構造を



第 3.1 図 模擬河川の構造

もつ理想化された河川を考えると、河川流量は次のような連立偏微分方程式で与えられることはよく知られている⁽⁶⁾

$$\frac{\partial h(x, t)}{\partial x} + \frac{1}{2g} \frac{\partial (v(x, t))^2}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial v(x, t)}{\partial t} = f v \cdot |v| \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial Q(x, t)}{\partial x} - \frac{\partial A(x, t)}{\partial t} = 0 \quad (3.2)$$

ここに、各記号はそれぞれ次の意味をもつ。

x : 下流から測った距離 t : 時間 $Q(x, t)$: 流量

$v(x, t)$: 流速 $h(x, t)$: 基準面から水面までの高さ

$A(x, t)$: 流出断面積

ただし、 $A = b(x) \{ h(x, t) - z(x) \}$

$b(x)$: 河幅 $z(x)$: 基準面から河床までの高さ

f : 損失係数

$$\text{ただし, } f = n^2 (h - z)^{-4/3}$$

n : 粗度係数

(3.1), (3.2) 式は, 比エネルギーの式および連続の式とよばれ, 河川ダイナミックスの基本となる式である。

(3.1), (3.2) 式を漸化式の形で表現すれば,

$$Q_{j+1,i} = Q_{j,i} + [(h_{j,i} - h_{j,i-1}) / \Delta t] [(b_j + b_{j+1}) \Delta x / 2] \quad (3.3)$$

$$\begin{aligned} h_{j+1,i} = & h_{j,i} - [(v_{j+1,i}^2 - v_{j,i}^2) / 2g] \\ & + [(v_{j,i+1} + v_{j+1,i+1} - v_{j,i-1} - v_{j+1,i-1}) / (4 \Delta t \cdot g)] \Delta x \\ & + [((n_j + n_{j+1}) / 2)^2 + (h_{j,i} - z_j)^{4/3} v_{j,i} \cdot |v_{j,i}|] \Delta x \end{aligned} \quad (3.4)$$

ただし,

$$\begin{aligned} v_{j,i} &= Q_{j,i} / [(h_{j,i} - z_j) \cdot b_j] \\ v_{j+1,i} &= Q_{j+1,i} / [(h_{j,i} - z_j) \cdot b_{j+1}] \end{aligned}$$

で与えられる。

したがって, ある地点の水位, 流量が与えられると, (3.3), (3.4) 式により, その地点から上流に向って各地点の流量の値を逐次計算することができる。

また, 上流での放流量が与えられるとき, その伝播を求めるには, 第 3.2 図のような流れ図にしたがって, 下流地点における水位, 到達流量を初期設定し, 逐次計算法により上流放流量と一致するまで繰返し計算する方法が考えられる。

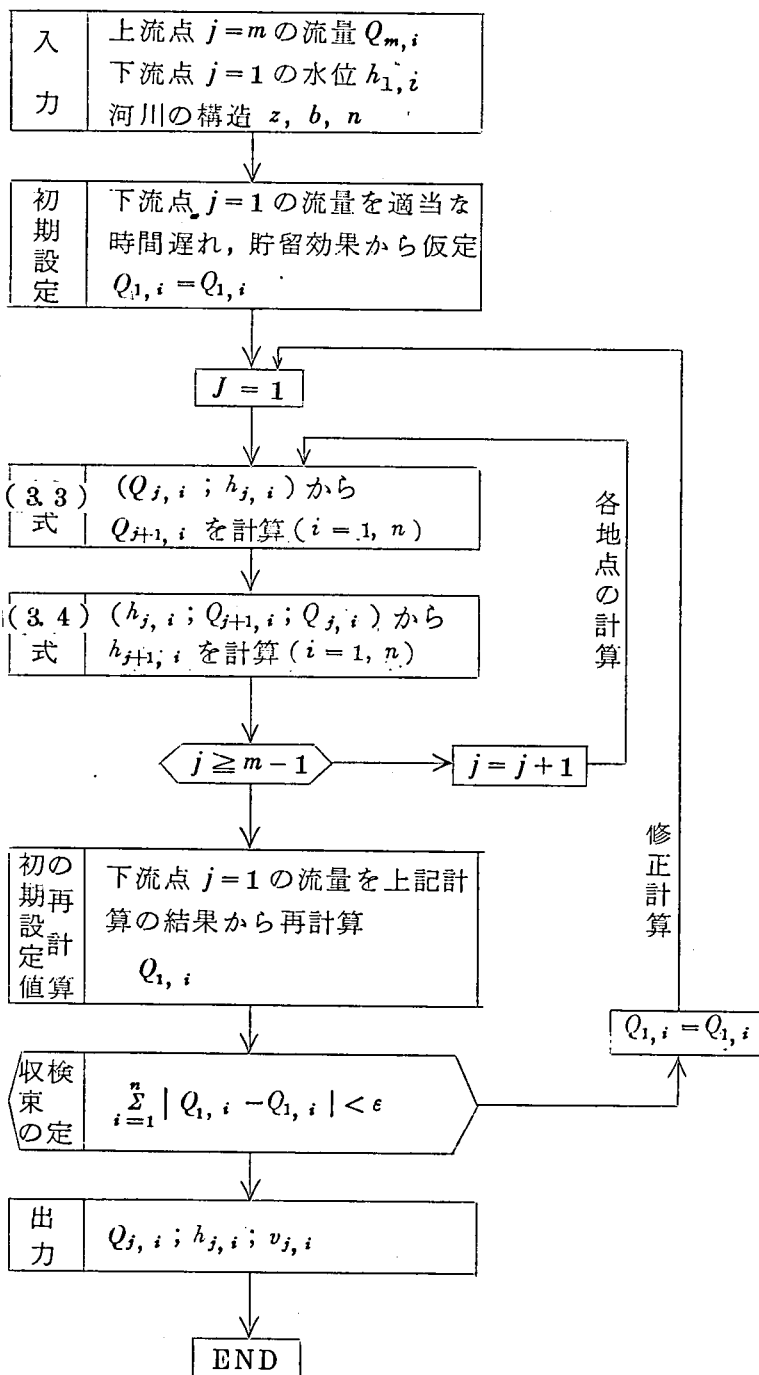
第 3.3 図は, 以下の検討の参考のために, この方法によって実規模に近い河川を設定し, 放流量の伝播特性をもとめたものである。

このような厳密な形で河川の流下特性を常時計算することは, これを実際に放流量のオンライン制御の目的に利用する場合には, 次のような問題点がある。

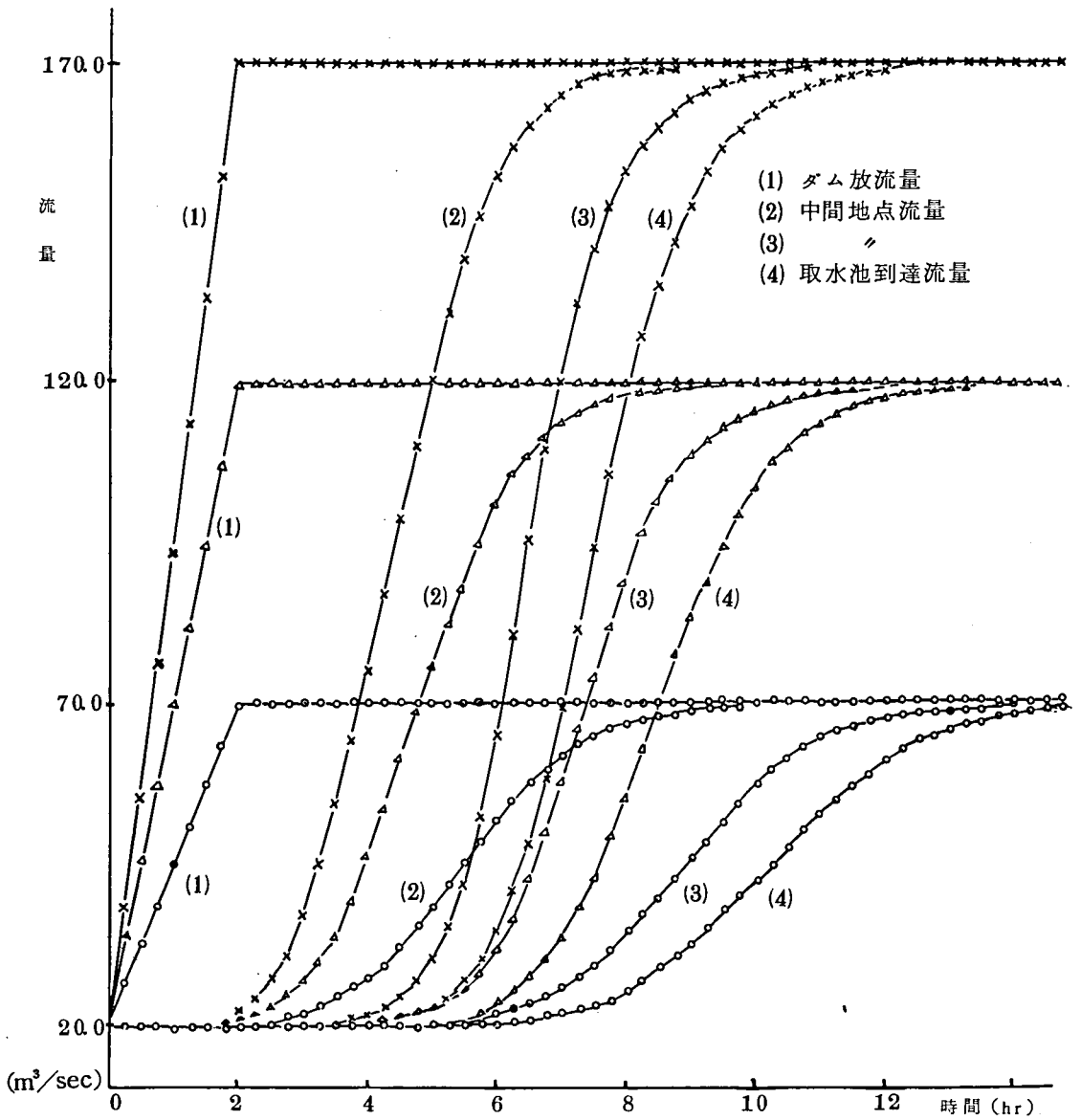
(1) 繰返し演算のため計算時間を要し, しかも連立偏微分方程式を解くために大規模な記憶容量を必要とする。

(2) 初期設定を誤ると収束しないことがある。

(3) 河川構造に関する諸定数の実測を必要とする。したがって, 洪水などにより河川の状況, 構造の変化があると実測をやり直すための多額の費用が必要となる。



第 3.2 図 逐次計算のフローチャート



第 3.3 図 理論式による伝播特性

- (4) 河川固有の未知定数が含まれている。
- (5) 河川の構造を理想化しており、現実の河川構造との類似性が保たれない場合がある。

これらは、オンライン制御のためのモデルとしては大きな欠点であり、現実
に、何らかのより簡単で必要な精度を満足させる機構がどうしても重要になる。

一般に、システムに計算機を導入しようとする場合に、従来、それとは無関
係に確立されているシステム固有の基本式を、どのように活かし、どのように
改良するかが大きな課題となるが、水系においても例外ではない。

3.3 オンライン制御のための新しいモデル

第 3.3 図の放流伝播特性の計算結果からも推察されるように、河川流下機構
は次のような性質をもっていることが予想できる。

- (1) 上流からの放流量が下流に到達するまでには、時間の遅れがある。
- (2) 到達が始まってからの立上り特性は比較的滑らかであり、一次あるいは
二次遅れ特性で近似できる。

もとより、河川流下機構は、放流量の大きさによって異なる非線形性を有し
ており、また地下水の伏流や河川構造の変化など種々の複雑な特性をもってい
るが、モデルを複雑にすることはオンライン制御のモデルとしては好ましくな
く、しかも必ずしも精度をあげることはできないので、ここでは上記 (1), (2) の
二つの大まかな特徴を利用して、河川流下機構を時間遅れをとまなり一次遅れ
特性で近似し、各定数を観測値を利用して時間とともに変化させる方法につい
て考察した。

尚、二次遅れ特性で近似する方法についても同様の検討を試みたが、部分的
に精度は向上するが、全体としてパラメータ可変の一次遅れ特性による場合と
大きな差が得られなかったので、以下に可変パラメータの少ない一次遅れ特性
による近似について考察する。

3.3.1 一次遅れ特性による近似

河川流下機構の近似モデルとして、時間遅れをとまなり一次遅れ特性を次の
ように一次近似の差分方程式で表現すると

$$Q(k+1) = (1 - \alpha(k))Q(k) + \alpha(k)\beta(k)P(k - \tau) + \xi(k) \quad (3.5)$$

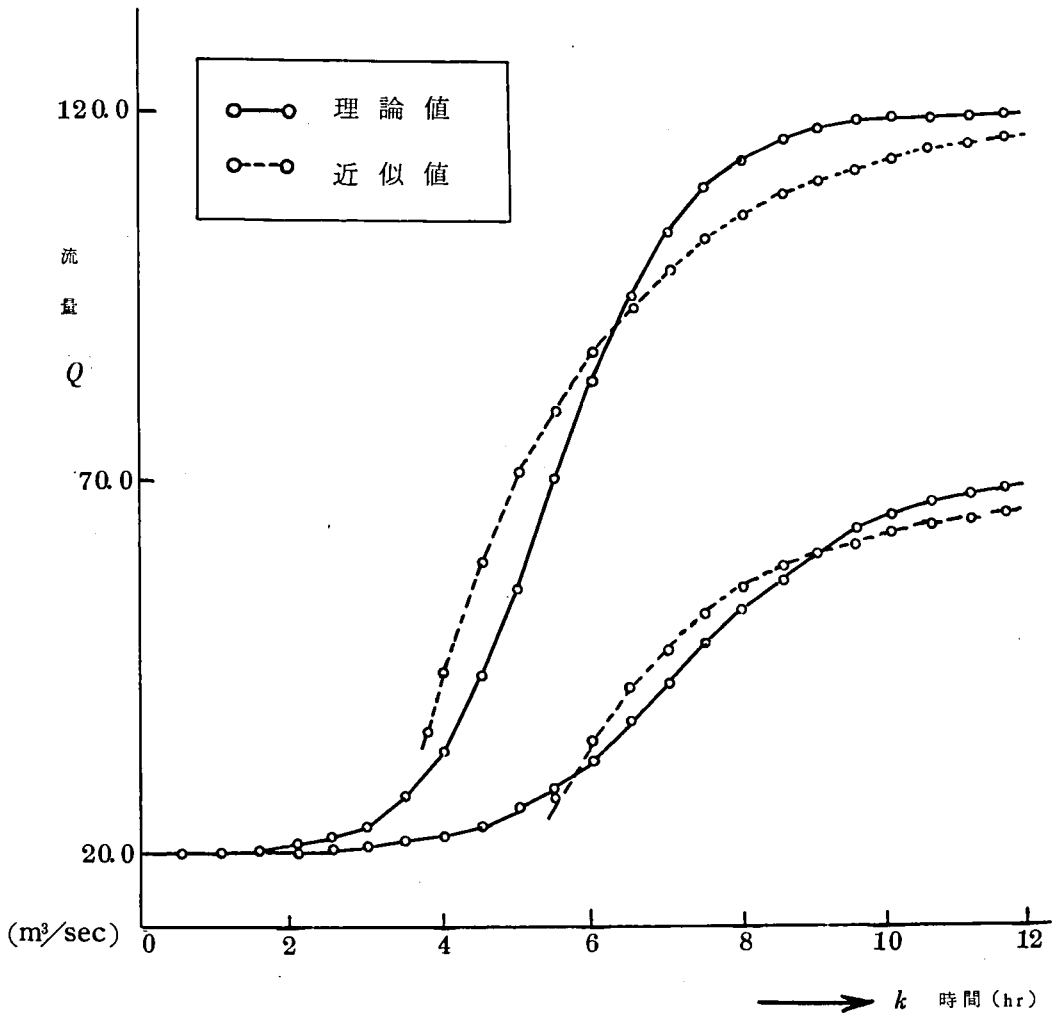
となる。

ここに、 $P(k)$ 、 $Q(k)$ はそれぞれ時刻 k における上流放流量、下流到達流量
をあらわし、 $\alpha(k)$ および $\beta(k)$ はそれぞれ系の時定数、およびゲインをあら
わすパラメータである。また、 $\xi(k)$ は系を (3.5) 式であらわした場合の誤差、

τ は遅れ時間をあらわしている。

このような簡単なモデルが現象をどの程度まで近似することができるかを調べるために、系のパラメータ $\alpha(k)$ 、 $\beta(k)$ 、 τ を時間 k に対して一定とし、(3.5)式により、放流量 $P(k)$ に対する到達流量 $Q(k)$ の値を $\varepsilon(k)$ を0として求めたのが第3.4図である。比較のために、第3.3図で求めた模擬河川の、同一放流量に対する応答波形を理論値として同時に示している。

近似の程度は α 、 β および τ の選定如何によって大巾に異なるが、この簡単

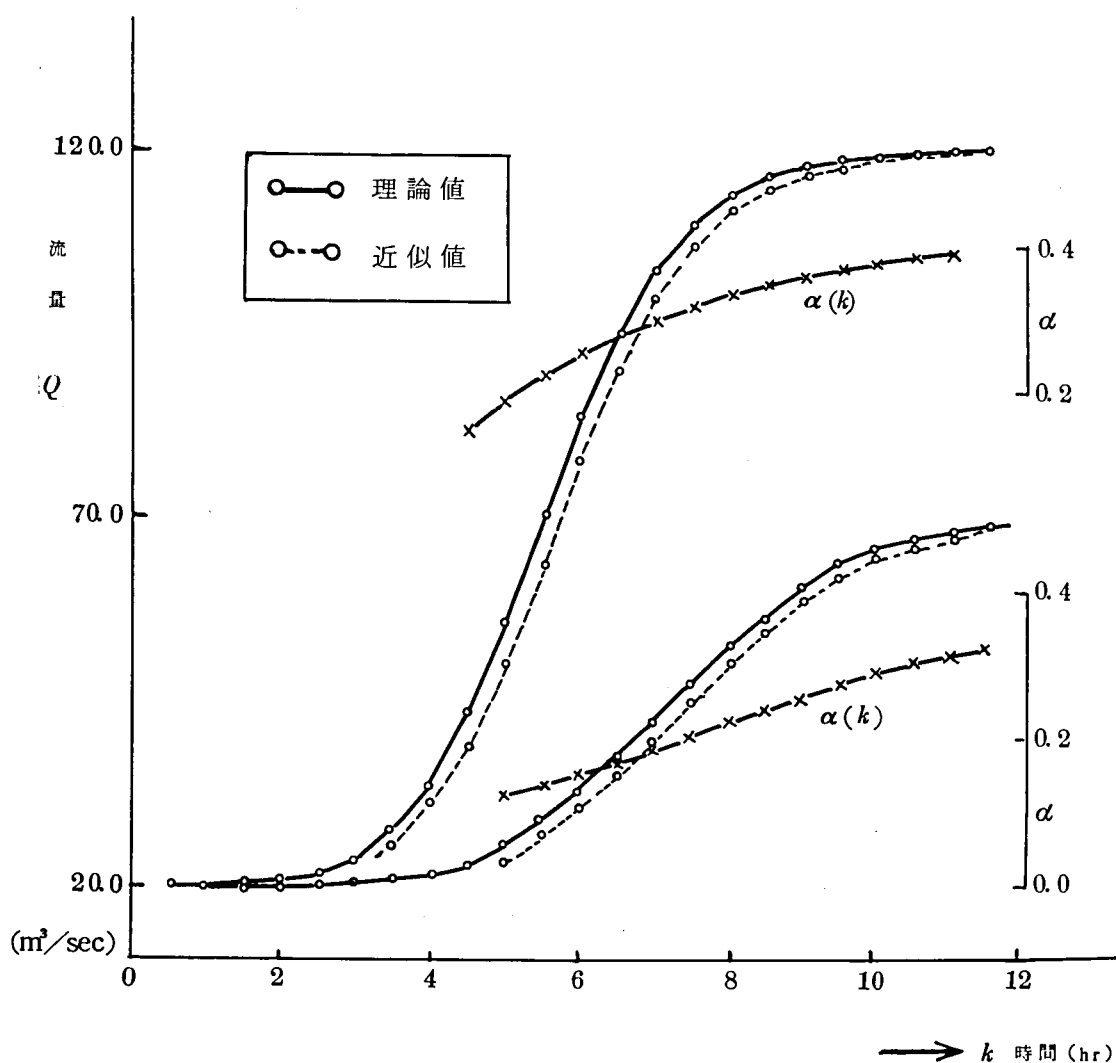


第3.4図 一次遅れ特性による近似 (パラメータ固定)

なモデルである程度まで現象を近似できることがわかる。しかし、云うまでもなく、これらのパラメータの最適値は流量の大きさによって異なる。

そこで、系の定数を固定せずに、到達流量の観測値を用いて逐次推定を繰り返し、パラメータを修正するという方法によって現象を模擬したのが第 3.5 図である。

すなわち、系の定数が一定ではなく、変化するものと考えて、その変化を観測値から推定しながら追従できるかどうかを調べたものである。



第 3.5 図 適応形一次遅れ特性による近似とパラメータの変化

実際の河川データには各種の雑音が含まれるものと考えられるが、ここではまず、理想河川の応答を単純なモデルでおきかえるという目的で、(3.5)式における $Q(k)$ そのものが観測されるとして、 k 時点までの観測値により、パラメータの最小自乗推定をおこなっている。

第3.5図の結果は、定数を固定した第3.4図の場合よりもはるかに改善されており、パラメータとした $\alpha(k)$ の変化もゆるやかである。しかも、この方法の利点は流量の異なる放流データのいずれに対しても誤差が大巾に異なることである。

3.3.2 放流実験による近似モデルの評価

前節で述べた可変パラメータを含む一次遅れモデルが実際の河川に適用できるかどうかを調べるために、放流実験をおこない、観測される到達流量と放流量の関係を検討した。

観測データには観測雑音が含まれると考えなければならないから、流量の観測値を $Q_0(k)$ として、

$$Q_0(k) = Q(k) + \eta(k) \quad (3.6)$$

で表わされるものとする。ここに、 $\eta(k)$ は観測雑音をあらわしている。

したがって、問題は(3.5)、(3.6)式であたえられるような系において、観測値 $Q_0(k)$ を得て、パラメータ $\alpha(k)$ 、 $\beta(k)$ 、 τ 、ならびに状態量(到達流量 $Q(k)$)を推定するという一般的な問題となる。

このような推定問題は、系に含まれる諸雑音の性質が明らかな場合には、理論的に厳密な取扱いが可能であるが、問題の性格からそれほど高い精度は本来期待できないので、実用上、次のような推定法によった。

すなわち、到達流量 $Q(k)$ の推定値 $Q^*(k)$ は系の定数 α 、 β 、 τ などが既知である場合に、

$$Q^*(k+1) = (1-r_1) \{ (1-\alpha) Q^*(k) + \alpha \cdot \beta \cdot P(k-\tau) \} + r_1 Q_0(k) \quad (3.7)$$

で与えられるものとする。

(3.7)式は、一時点前の状態量(流量)推定値にもとづく理論予測値と現時点の観測値とを重みづけして組み合わせたいわゆるカルマン形の推定法に準じている。

平滑定数 r_1 は、 $\varepsilon(k)$ ((3.5)式)、 $\eta(k)$ ((3.6)式)の性質によって最適

値が選ばれるが、ここでは雑音の定量的な把握がむづかしいので、次節にのべる評価基準により、 $0 < r_1 < 1$ の適当な値を選んでいる。

一方、系のパラメータの推定は、これを変化のゆるやかな状態量とみて、 $Q(k)$ の推定と同様に取り扱うこともできるが、ここではそれぞれ独立に、(3.7) 式にもとづく流量推定値 $Q^*(k)$ を用いて、たとえば、パラメータ $\alpha(k)$ の推定値 $\alpha^*(k)$ は、

$$\alpha^*(k) = (1 - r_2) \alpha^*(k-1) + r_2 \frac{Q^*(k+1) - Q^*(k)}{\beta \cdot P(k-\tau) - Q^*(k)} \quad (3.8)$$

で与えられるものとした。

ここに r_2 は、 $0 < r_2 < 1$ の平滑定数であるが、(3.8) 式は、重みづけをした逐次形の最小自乗法とみることもできる。

以上のように、状態量の推定とパラメータの推定をそれぞれ独立に取り扱い、(3.7) 式で用いる α は、(3.8) 式で推定される最も新しい α を変化がゆるやかであるとして採用し、これらを交互に繰り返して、流量の推定をおこなった。さらに、 $k+i$ 時点までの予測は、最新の $\alpha^*(k)$ をそのまま用いて、

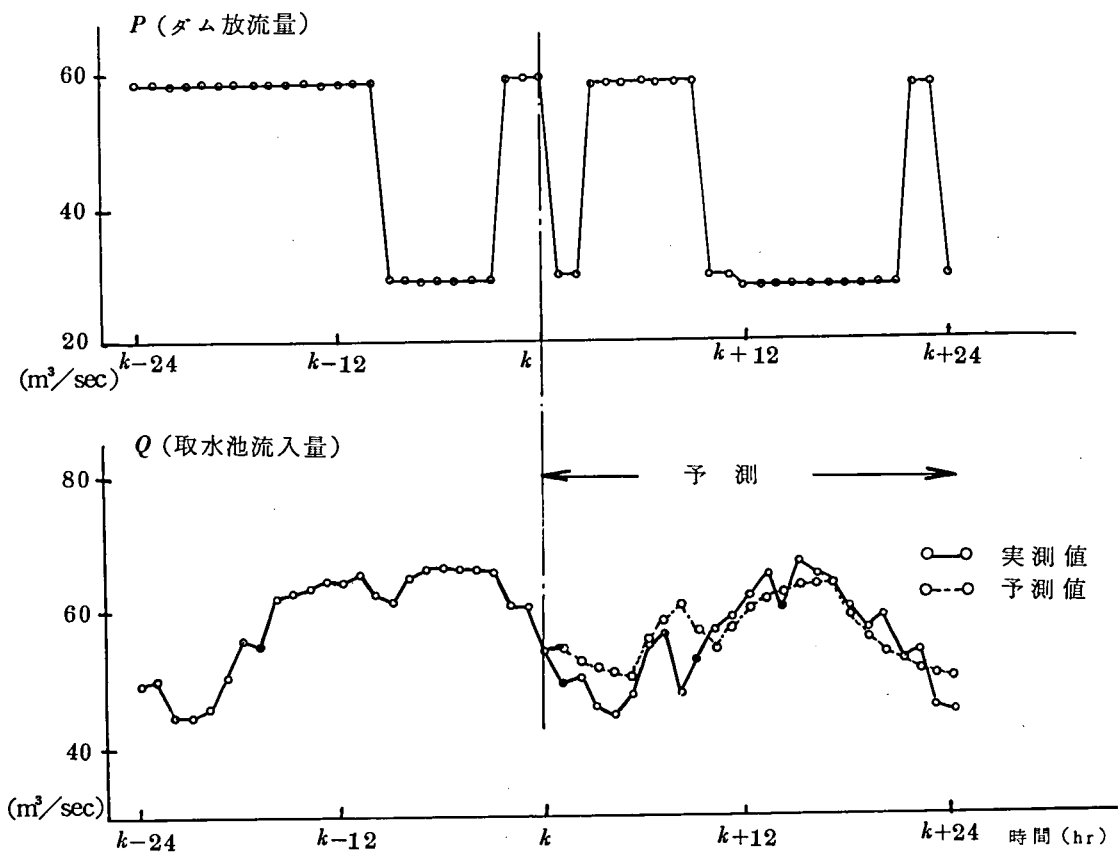
$$Q^*(k+i) = (1 - \alpha^*(k)) Q^*(k+i-1) + \alpha^*(k) \beta \cdot P(k-\tau+i-1) \quad (3.9)$$

によって逐次計算をおこなっている。

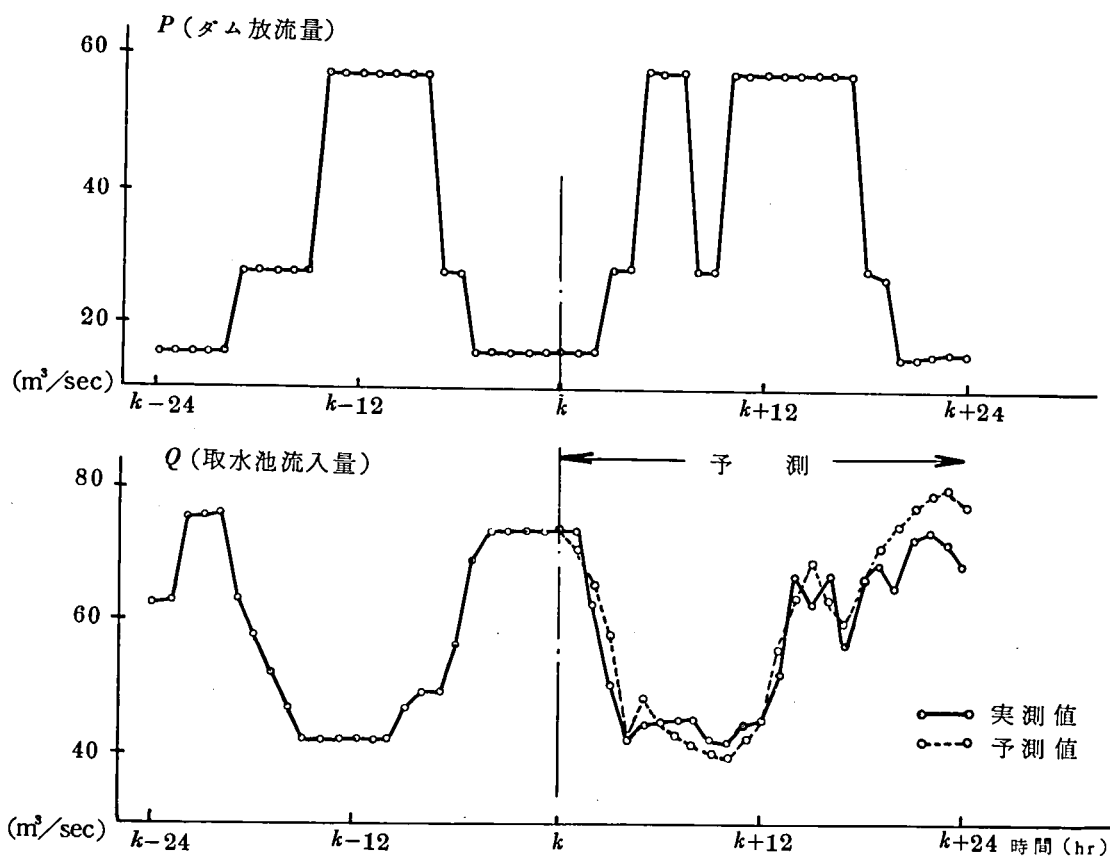
なお、パラメータ α 、 β および τ のなかで遅れ時間 τ は放流量の大きさによってほぼ定まる一定値であり、また、システムゲイン β は、変化分だけ考えれば、放流量がほとんど到達すると考えることができるので、ここでは可変パラメータとして $\alpha(k)$ だけを考慮した。

第 3.6 図 a, b は、このようにして時刻 k において過去の観測データからモデルを決定し、24 時間先までの流量予測をおこなった結果である。

予測の結果は二例とも実験値とよく一致し良好であるが、これらの評価は、予測誤差を基準とし、取水調整池の誤差吸収能力との関係において評価することが実用上必要である。本節で述べたモデルならびに推定の方式の検討は、さらに制御の問題と併せて論じられるべきであり、次節において詳述する。



第 3.6 図 (a) 予測実験結果 - I



第 3.6 図 (b) 予測実験結果 - II

3.4 水力発電量のオンライン制御

河口への無効放流を最小にするような発電放流量制御の問題は、前節までの検討にもとづいて、次のように数式化される。

3.4.1 問題の数式化

時刻 k における放流量を $P(k)$ ，下流到達流量を $Q(k)$ ，流量観測値を $Q_0(k)$ とすれば、前節の検討から、系は

$$Q(k+1) = (1 - \alpha(k)) Q(k) + \alpha(k) \beta \cdot P(k - \tau) + \xi(k) \quad (3.10)$$

$$Q_0(k) = Q(k) + \eta(k) \quad (3.11)$$

であらわされる。

ここに $\alpha(k)$ は系の時定数をあたえる可変パラメータ， β はシステムゲイン， τ は遅れ時間である。また $\varepsilon(k)$ ， $\eta(k)$ はそれぞれ系固有雑音，観測雑音を示している。

放流量制御の問題は， k 時刻の水需要 $d(k)$ を過不足なく満足させるように $P(k)$ を決定する問題であり，目的関数

$$J = \sum_{i=1}^N (Q(i) - d(i))^2 \quad (3.12)$$

を最小にする問題として数式化できる。

(3.12) 式における期間 N は十分長い時間を考慮すべきであるが，過不足を吸収するための下流取水調整池の容量は一般に小さく，かつ不足は許されないから，常に需要を満たすことを目的として，

$$J = (Q(k) - d(k))^2 \quad (3.13)$$

を最小にする問題と考える。

系に雑音がなく，各パラメータが既知であり，操作量すなわち発電放流量に上下限の制約がなければ，最適放流量 $P^*(k)$ は，(3.10) 式および (3.13) 式から，

$$P^*(k) = \frac{1}{\alpha(k+\tau) \cdot \beta} \{ d(k+\tau) - (1 - \alpha(k+\tau)) Q(k+\tau) \} \quad (3.14)$$

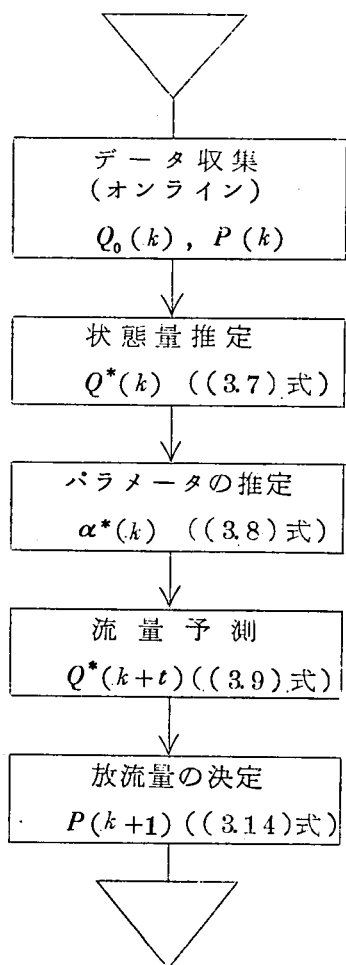
で与えられる。このような場合には，水需要 $d(k+\tau)$ が明らかであれば， $J=0$ が常に満たされる。

しかし，現実には，パラメータは未知で変動があり，各種の雑音は無視できないから，推定，同定，予測，最適化などの諸問題が生じ，厳密な意味での最適制御方式を確立することは必ずしも容易ではない。

3.4.2 現実に用いた制御方式

確率的な系の推定，同定，最適化の問題は厳密には分離しえないが，問題の性格から，本文では，これらを独立に取り扱い，前節で述べたように，まず，観測値から状態量の推定をおこない，それを用いてパラメータを求め，さらに，それらから状態量の予測とそれにもとづく最適操作量の決定をおこなった。これは (3.14) 式において， $\alpha(k+\tau)$ ， $Q(k+\tau)$ をそれぞれ，(3.8)，(3.9) 式で求めた $\alpha^*(k)$ ， $Q^*(k+\tau)$ におきかえて， $P^*(k)$ を算出したことに相当する。

第 3.7 図はこの手順を示している。



第 3.7 図 制御計算流れ図

なお、決定された $P^*(k)$ が上下制限値にふれる場合には限界値をとり、過不足はある程度まで下流地点の取水調整池でおぎなうことができるものと考えた。

制御の評価を調整池を溢水する量でとらえ、逆にその調整池の容量の必要十分量の算定を試み、ダム設計の資料とした。

このような制御方式は、推定、同定、最適化の問題を分離して考えている点で厳密な意味での最適性を欠くが、単に、観測値をそのまま用いてモデル決定

をおこない操作量を設定する場合よりもはるかに優れていることが、後で述べるシミュレーションの結果からも明らかである。また、このような制御方式の良否を、調整池容量の大きさという形で評価し、現実期待される要求条件内に制御の精度をおさえていこうとする点で、十分意味をもつ方式であると考えらる。

3.4.3 計算機シミュレーションによる制御評価

(3.10), (3.11)式で与えられる河川プロセスを計算機で模擬し、一方それから得られる状態量観測値を第3.7図の手順に従って逐次分析し、最適操作量の決定を繰り返した。制御の評価として水需要と到達流量の誤差積分値をとったが、この最大値が、取水調整池の容量を与える目安となり、この値が小さい程望ましい制御であると云える。

実験にあたっては、系雑音 $\xi(k)$ 、観測雑音 $\eta(k)$ としてあらかじめ分散値のわかっている正規雑音を加え、パラメータ $\alpha(k)$ は、正弦波状にゆるやかに変化させた。

第3.8図は、

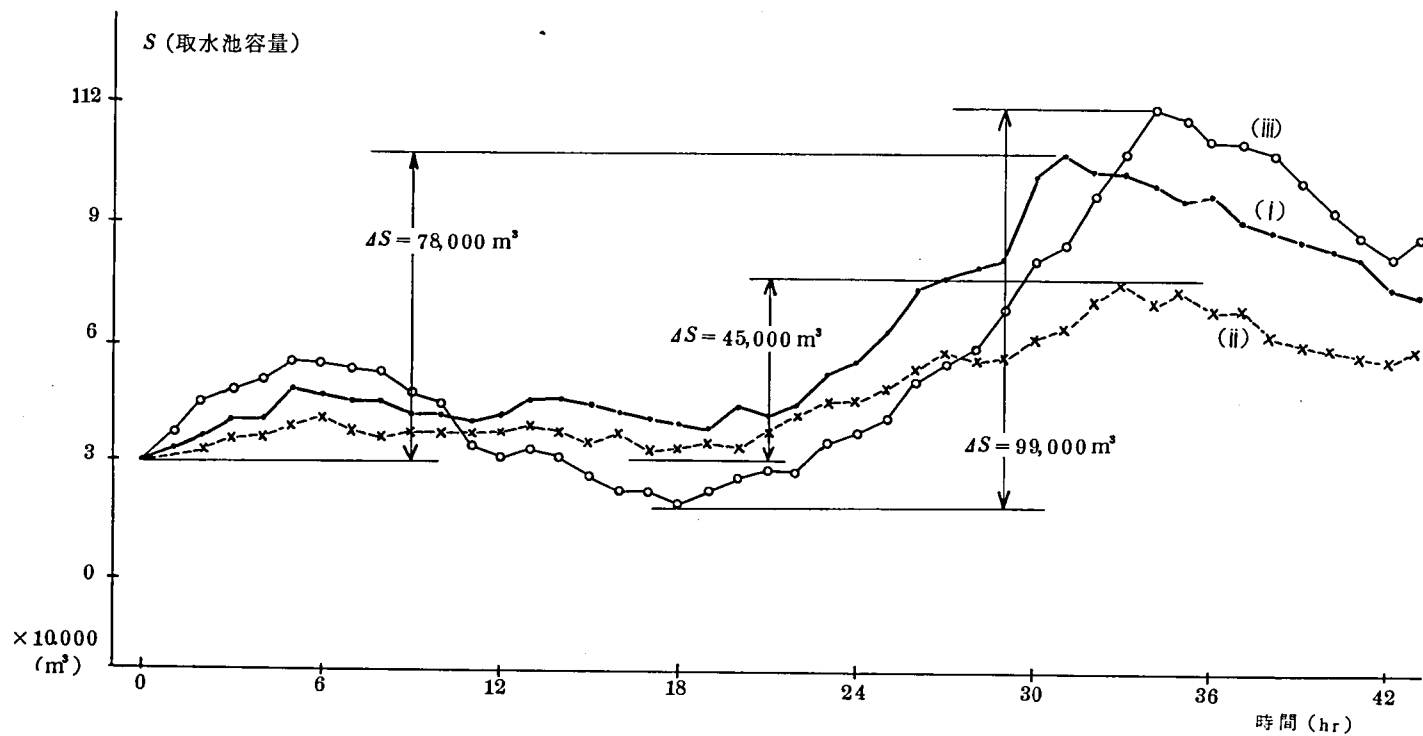
(i) 観測値をそのまま流量値と考え、過去一定期間のデータからパラメータを最小自乗法で決定し、予測制御をおこなった場合

(ii) 前節で述べた方式によって制御した場合
取水池容量 s で
の制御評価を示している。比較のために、さらに

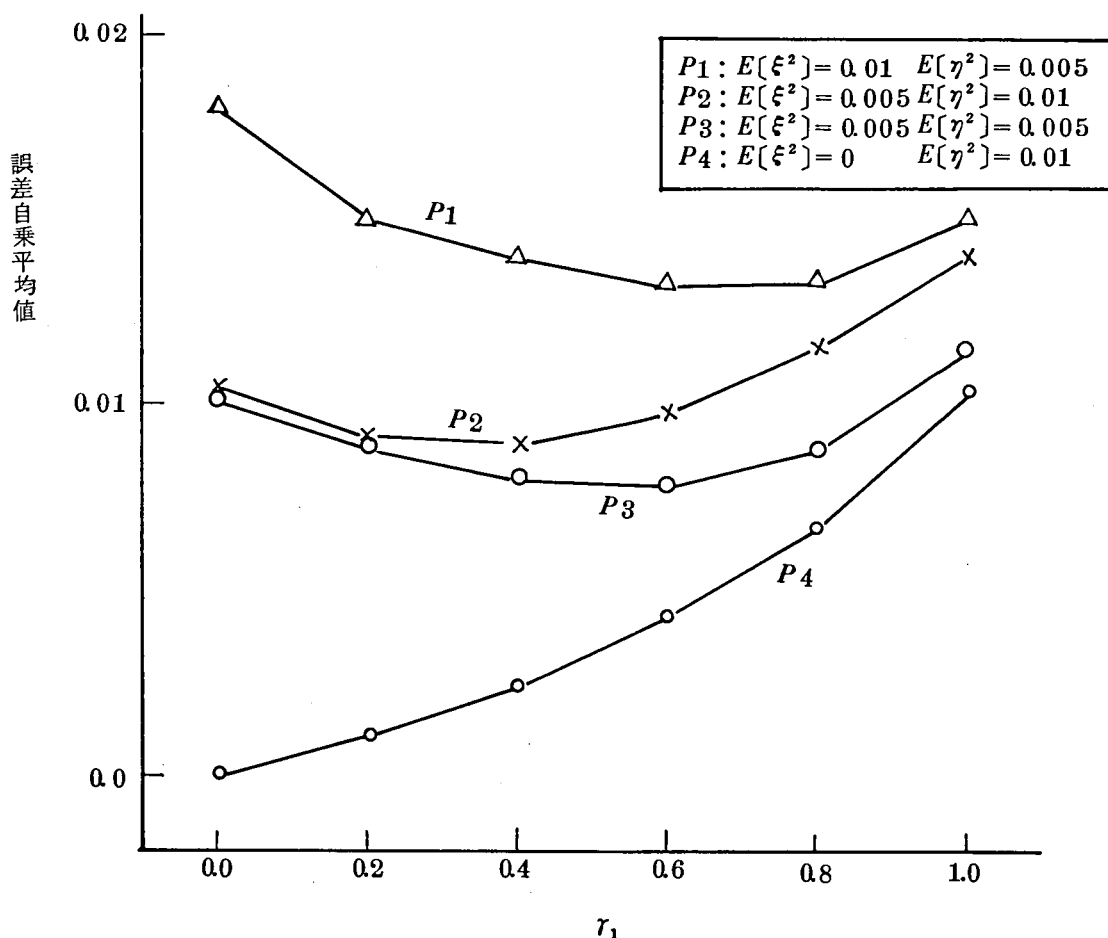
(iii) 系のパラメータを固定定数と考えた場合

の結果を示しているが、本文で展開した制御方式が大巾に取水調整池の容量を低減していることがわかる。

なお、推定に用いた定数 r_1 の選定((3.7)式)と制御誤差との間には、附加した雑音の大きさの組合せによって明らかな関係がみられる。第3.9図は推定に用いた平滑定数と、誤差の自乗平均値との関係をいくつかの雑音の大きさの組合せに対して示している。この図から容易に考えられるように、より望ましい推定のためには、雑音の大きさの何らかの推定が不可欠になるが、これらの問題については、第4章において詳しく検討する。



第 3.8 図 シミュレーションによる制御評価

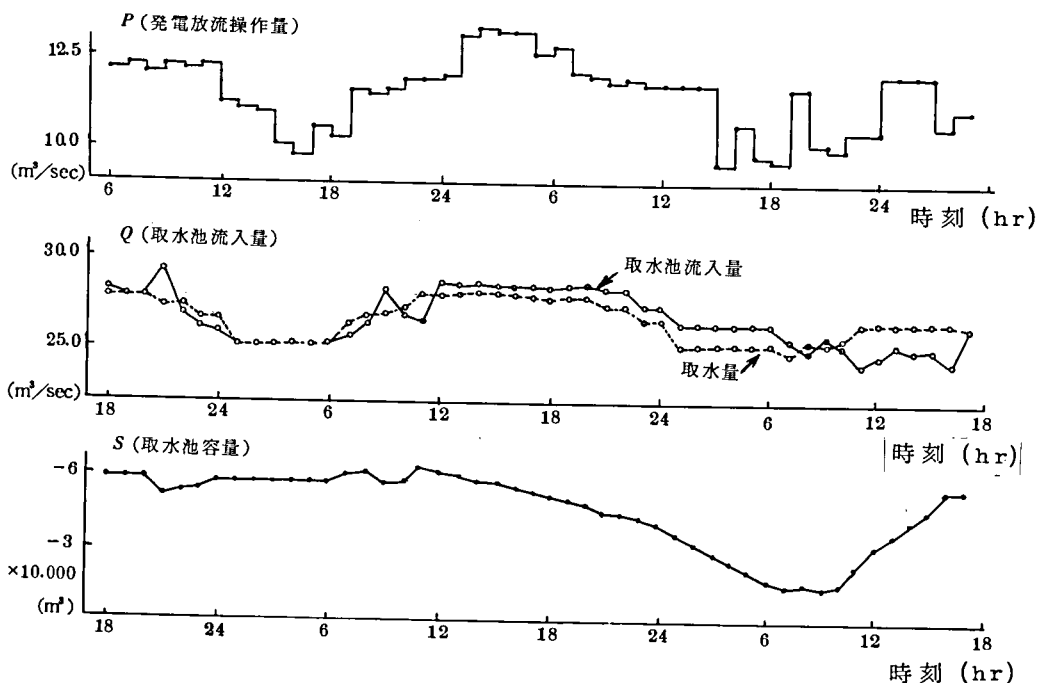


第 3.9 図 平滑定数と制御誤差の関係

3.4.4 放流制御実験

前節までの考察にもとづいて制御プログラムをつくり、実際に一時間単位に発電量を制御する実験を相模川水系津久井発電所においておこなった。取水地点の観測は、放流地点から 12 時間前後の遅れのある 30 km 近く離れた寒川取水調整池である。制御結果を第 3.10 図に示す。

実験結果は、この制御方式が変動する水需要—取水量—に対してよく追従していることを示している。すなわち $1 \text{ m}^3/\text{sec}$ 程度の誤差が 10 時間継続されるとしても、約 $40,000 \text{ m}^3$ の調整池容量があればよく、現実には数万 m^3 (80,000



第 3.10 図 発電放流量制御実験結果

$\text{m}^3 \sim 100,000 \text{ m}^3$) のバッファ容量が確保されているから、第 3.10 図の例ではほとんど無効溢水がないことになる。

現実には取水予定量の変更があったり、発電所側に制御指令が忠実に守られない制約があったりして、完全を望むことはむづかしいが、本制御方式は、基本的に十分目的を満たしていると云える。

制御の前提となる流量予測に関しては、多量の観測データにもとづいて検討した。 $20 \text{ m}^3/\text{sec}$ 程度の水需要に対して $2 \text{ m}^3/\text{sec}$ 内外の予測誤差はさけられないが、短かい周期で正負の誤差となり、積分型の調整池の効果が発揮され、制御の質は十分良好であることを確かめている。

3.5 適用上の諸問題

以上は河川プロセスを上流側からの放流に対する下流到達流量の関係において動的にとらえ、発電放流量制御の問題を考えたが、現実に応用するにあたっ

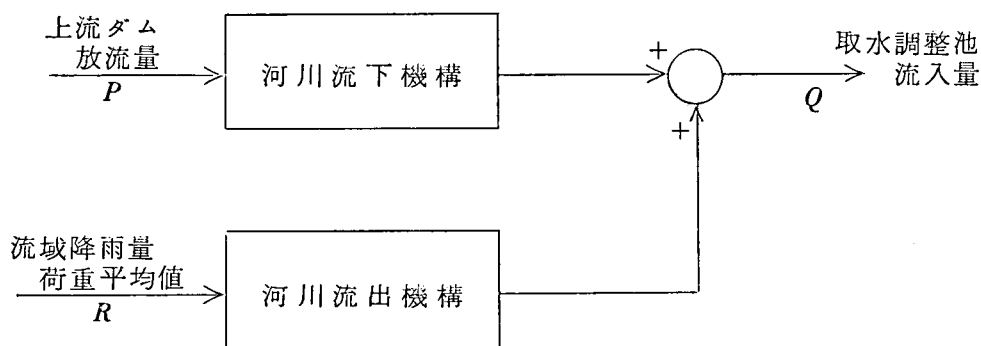
ては、さらに次のような問題がある。すなわち、

- (1) 流域内に降雨があり、支川から下流地点に到達する流量がある場合
- (2) 渇水期において、流量の基底流量の変動がほとんどなく、しかも需要変動がゆるやかでプロセスが静的である場合

においては、これまでの検討だけでは必ずしも十分ではない。このような場合の取扱いのために、次のような拡張をおこなった。

3.5.1 降雨がある場合の下流到達流量の予測

流域内に降雨があると、時間的な遅れをともなって河川流出が増加する。この降雨から流出に至るプロセスについては、第2章において、洪水的出水を中心に詳しく検討し、予測機構を開発したが、支川における小出水についても同様の方式で十分予測できることを、実データによる解析で確かめた。

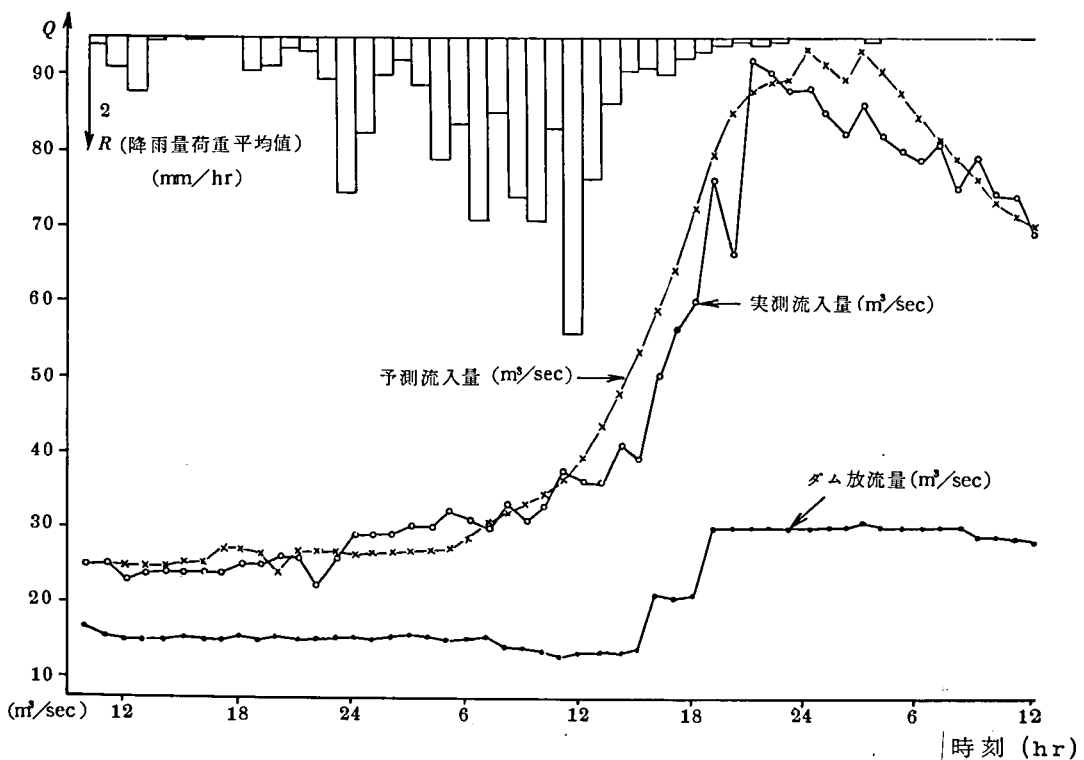


第 3.11 図 合成モデル概念図

これを用いて、下流地点への到達流量は、本章で述べた上流からの放流の到達と降雨による流出の和として第 3.11 図のように表現し、その合成比をパラメータとして観測流量による適応形の予測機構に拡張した。

第 3.12 図は、下流に降雨がある場合の下流取水地点への到達流量予測結果を示している。図は、降雨と上流の放流による下流到達流量が、本文で開発したモデルでおおむね把握できることをよくあらわしている。

流出予測の問題点は、長時間先の流出量を予測するためには降雨量の予測を必要とすることである。しかし、地域的な降雨量の適確な予測は現段階ではほとんど不可能であり、現実には、いくつかの降雨パターンの導入により安全解



第 3.12 図 降雨のある場合の取水池流入量予測

を得るような工夫をほどこすとともに、新しい情報による修正を繰り返すことによって、これをおぎなっている。

到達流量の予測ができると、前節で述べた手順により放流すべき最適量が決定できる。水資源の豊かでない季節においては、下流域の小出水を期待してダム放流を調節することが十分考えられる。

3.5.2 無降雨の場合の平均值的解析

降雨もなく、基底流量の変化もなく、かつ水需要に変動の少ない場合には、プロセスは静的であって、観測値から系のパラメータを推定して操作量を決定するということが好ましくない場合がある。

このような場合には、放流量、支川流量、および到達流量を何時間かの平均値としてとらえ、それらの相関関係を分析することで十分であるかもしれない。

第 3.13 図は、これらの関係を、

$$Q_S = aP + bQ_N + c \quad (3.15)$$

ただし、

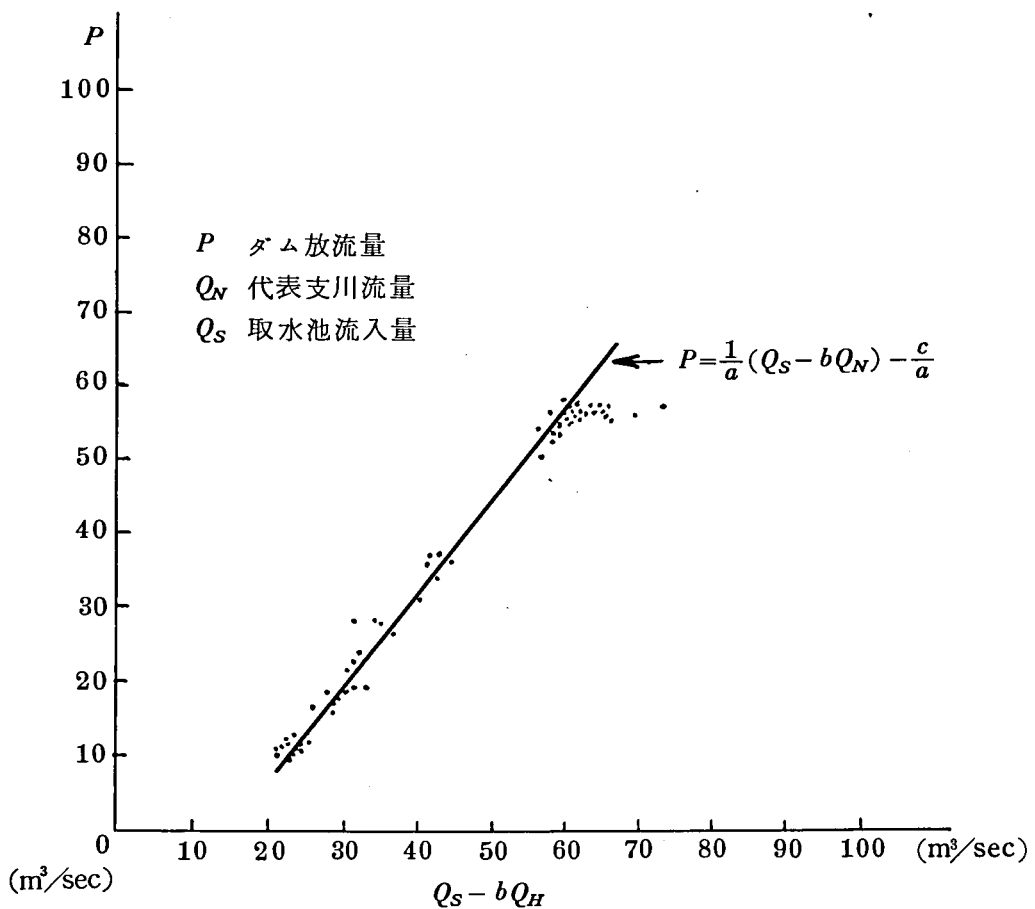
Q_S : 到達流量平均値

P : 時間遅れを考慮した放流量平均値

Q_N : 時間遅れを考慮した支川流量平均値

であらわした場合の P と $(Q_S - bQ_N)$ の関係を図示している。

支川は代表支川として比較的流況の豊かなものを選び、各平均値は、時間差を考慮して 6 時間毎の平均値を用いている。



第 3.13 図 ダム放流量と取水池流入量の平均的相関関係

(3.15)式における a , b , c などの定数は季節, 時間帯などにより異なり, 多量のデータから画一的な値を設定するよりも, 現実の観測結果を利用して部分的に修正あるいは補正することが望ましいと思われる。

そこで a , b , c の各定数は, 旬あるいは月の単位で修正するとともに, (3.15)式にさらに観測値とのずれを補正項として加え,

$$Q_S^i = aP^i + bQ_N^i + c + D_{i-\tau} \quad (3.16)$$

の形で与えられるものとした。

$D_{i-\tau}$ は, τ 時間前の予測値と観測値とのずれをあらわしている。このことは, 平均値的に解析した a , b , c の定数によって与えられた予測結果が, τ 時刻前に $D_{i-\tau}$ なる誤差があるとき, $D_{i-\tau}$ だけ現時点 i においてもずれがあるとして補正していることになる。

この補正項の効果は, これを加えない場合の i 時点の誤差と $i-\tau$ 時点の誤差との相関の強さによって意味づけられる。

検討の結果,⁽⁶¹⁾ 24 時間前の誤差が現時点の誤差と比較的強い相関をもつことがわかったので, 現実には, 平均値的な取扱いをする場合には, τ として 24 時間を採用している。

プロセスの変化がほとんどない場合には, このような方式によっても, 十分実用に耐える流量予測が可能である。

3.5.3 長期運用, 日間運用との関係

本章では, 水需要に対する必要十分量の供給という観点から発電放流量制御の問題を実時間制御を前提として検討してきたが, 本来, 貯水池の運用は年単位, 旬単位, 日単位というように段階的なとらえかたがなされており, それらに対しても巨視的な意味で取水量確保という目的が一種の制約条件として考慮されていることは言うまでもない。

ここでは, そのような制約の上に立てられた日間計画に対して, さらにきめ細かく無効放流を極力おさえることを目的とした時間運用について検討したものである。

現実の適用にあたっては, 日間運用スケジュールに対する変化巾を制御限界として規定し, その範囲内で過剰放流を抑えることを原則としている。

3.6 結言

本章は、増大する水需要に対して無効放流を極力少なくすることを目的とした水力発電量のオンライン制御について、河川流下機構と併せて検討したものである。

解析、実験にあたっては、相模川水系津久井発電所、城山ダム下流本川、寒川調整池ならびにその流域を対象とした。主要な結論は次のとおりである。

(1) 河川流下のダイナミックスを与える古典的な基本式は、初期状態を設定して繰返し形の演算によって解かれるが、実時間制御のためのモデルとしては必ずしも適当でなく、より簡単な機構の開発が必要である。

(2) 河川が比較的ゆるやかな応答をするプロセスであることに着目して、可変形のパラメータをもつ一次遅れ特性で近似し、十分実用に供しうることを確かめた。

(3) 水需要を必要十分に満たすための発電放流量制御の問題は、雑音を含むプロセスの推定、同定、最適化の問題にまとめられるが、問題の性質から、それほど高い精度は期待できないので、厳密な解を求めることはさけ、それぞれ分離した現実的な方法によって解き、制御評価を誤差吸収能力をもつ取水調整池の容量であらわした。これを尺度として本方式の効果を確認めた。

(4) 現実の適用にあたって、さらに降雨のある場合、ならびにプロセスが静的である場合について拡張し、それぞれ実験による確認をおこなった。

なお、本章では、状態量あるいはパラメータの推定、同定などの問題において、含まれる雑音特性の細かな検討はしていない。これらについては、一般的な問題に拡張して次章で詳しく検討することにした。

第4章 逐次形推定法の応用と 系雑音および観測雑音の分離機構

4.1 緒言

種々のシステムの計算機制御が各分野で実用化されつつあるが、現実の制御対象はその状態の計測誤差はいうまでもなく、系の内部で生じる系固有雑音を含んでいる。しかもシステムを完全に記述するのがむづかしい場合が多く、系の特性の近似誤差も少なくない。したがって系を確率的に把握して制御の問題を考えなければならないのが普通である。

このような系において、状態量の予測あるいはそれにもとづく制御の問題を考える場合に、得られた観測値を利用して自動的に予測値の修正および操作量の設定が逐次におこなえる逐次形推定法が有効であると考えられる。

本章では、逐次形推定法をシステムのオンライン制御に適用するにあたって、はじめにいくつかの実例について問題の定式化を試み、つづいてそれを実際に適用する場合の問題点について検討する。特に、適用にあたって推定ならびに制御の良否を左右するシステムの諸雑音の把握について、詳しく検討し、新しく開発した独自の雑音特性分離機構についてその方法および特性を述べる。⁽¹²⁾

この雑音分離機構を併用することにより、従来、理論的な開発段階にあった適応形逐次推定をより現実的に適用できるようになったと考える。

逐次形推定法は、Kalman,⁽⁹⁾ Bucy⁽¹⁰⁾ によって提唱され、カルマンフィルタ⁽¹¹⁾とよばれ、宇宙情報の処理などに実用されている^{(27), (28)}が、Aoki⁽¹⁸⁾らは、ベイズ推定法の一つの応用として同様の推定式を導き、逐次形フィルタ (Sequential Filter) と名づけている。

この推定法は、観測値と状態量の理論予測値との重みづけ平均の形で状態量の予測をおこなおうとするもので、重みづけ係数を系に固有の雑音成分と観測にともなう雑音成分の系に与える効果によって可変にしていくなかに特徴がある。したがって、より望ましい推定のためには、系における唯一の情報源である観測値時系列から、これらの雑音成分の大きさを分離、推定する必要があるが、その具体的な方法や特性については、今まであまり検討されていない。

4.2 逐次形推定法の適用と問題点

システムのオンライン制御時にカルマン理論を適用するにあたっては、対象とする系の状態量，操作量および観測量の諸関係ならびに，系に固有の雑音成分および観測にともなう雑音の性質を明らかにしておく必要がある。以下に，現実のシステムで直面するいくつかの問題の定式化を試みる。

(1) 定常モデル（極く短期の予測モデル）

比較的定常的な現象の極く短期間の予測を考えると，状態量 x_k はほとんど変化がないとして，次のように考えることができる。

いま，第 4.1 図のように，時刻 k における状態量を x_k ，観測値を y_k とすれば，

$$x_{k+1} = x_k + w_k \quad (4.1)$$

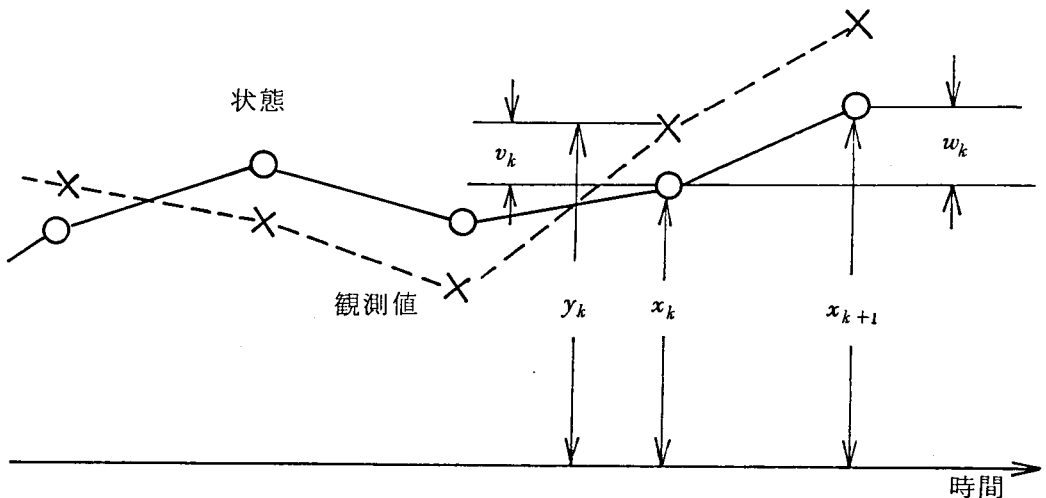
$$y_k = x_k + v_k \quad (4.2)$$

であらわされる。

ここに，系固有雑音 w_k ，観測雑音 v_k は，

$$\left. \begin{aligned} E[w_k] &= 0, & E[w_k w_j] &= Q_k \delta_{kj} \\ E[v_k] &= 0, & E[v_k v_j] &= R_k \delta_{kj} \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

のような性質があるものとする。ここで， Q_k ， R_k は，雑音の分散を与えるパラメータ， δ_{kj} はクロネッカーのデルタである。



第 4.1 図 定常モデル

さらに,

$$\left. \begin{aligned} E[w_k v_k] &= 0, & E[x_0 w_k] &= 0 \\ E[x_0 v_k] &= 0, & (k &= 0, 1, \dots) \end{aligned} \right\} \quad (4.4)$$

のような性質があるとき, 状態量の最適推定値はカルマンの推定式を用いて,

$$x_{k+1}^* = x_k^* + K_{k+1} (y_{k+1} - x_k^*) = (1 - K_{k+1}) x_k^* + K_{k+1} y_{k+1} \quad (4.5)$$

ただし,

$$K_{k+1} = \frac{R_k K_k + Q_k}{R_k K_k + Q_k + R_{k+1}} \quad (4.6)$$

であたえられる。

(4.5) 式は, 観測値 y_{k+1} と理論予測値 x_k^* の重みづけ平均の形をしており, この例のようにモデルが定常モデルの場合には指数平滑法と同一の形をしているが, 平滑定数 K_{k+1} が, (4.6) 式のように逐次変化するところに特徴がある。

とくに, 系雑音 w_k が観測雑音 v_k にくらべて大きい ($Q \gg R$) ときには, $K_\infty \doteq 1 - R/Q$ となり観測値による修正を大事にする形になる。逆に観測雑音が大きい ($R \gg Q$) ときには, $K_\infty = \sqrt{Q/R}$ となってこれまでの予測の結果を大事にする形になる。この特性は, 指数平滑形予測の場合経験的に確認されてきた性質であるが, カルマン形の場合さらに厳密に意味づけをしていることになる。

この平滑定数 K_{k+1} は, 雑音成分の大きさ Q_k , R_k が事前に明らかな場合には, (4.6) 式により逐次計算することができるが, 未知の場合, あるいは変動するような場合には, 観測値時系列にもとづく雑音特性の推定が必要になる。

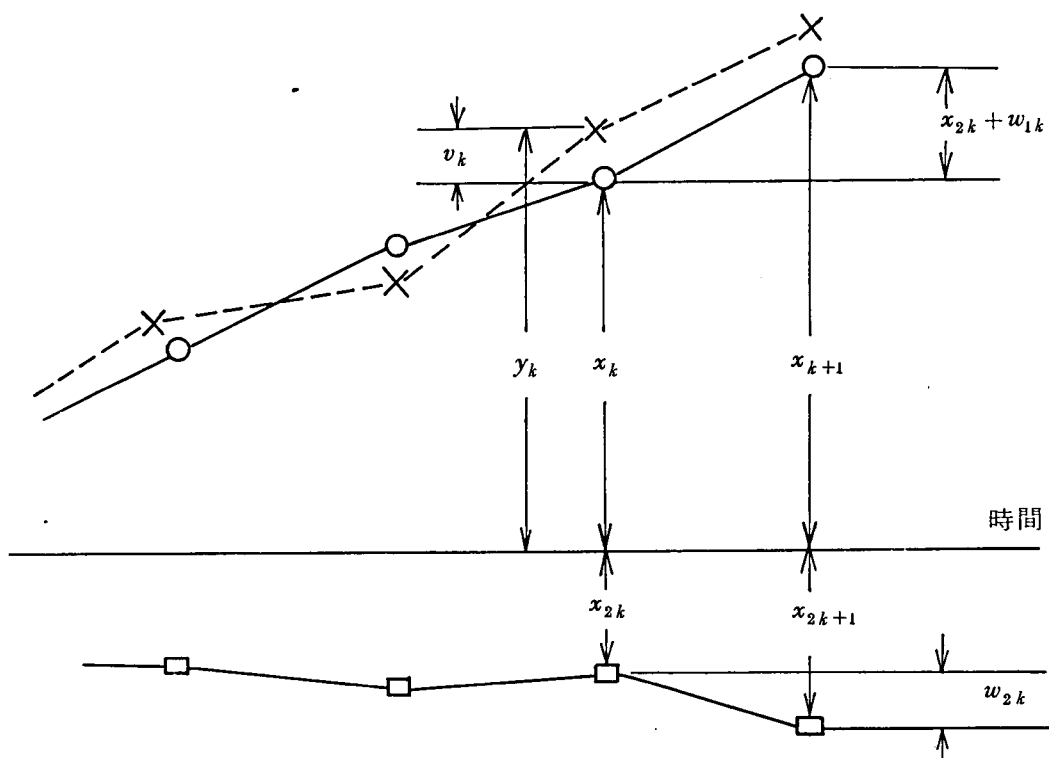
(2) 短期の予測モデル

比較的定常的なプロセスの短期の予測モデルとして, 第 4.2 図のように, 傾向因子を導入するモデルが考えられる。すなわち, モデルは,

$$\begin{bmatrix} x_{1k+1} \\ x_{2k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1k} \\ x_{2k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{1k} \\ w_{2k} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

$$y_k = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1k} \\ x_{2k} \end{bmatrix} + v_k \quad (4.8)$$

k 時点での
のように, 状態量 x_{1k} と傾向因子 x_{2k} を含む形になる。また y_k は状態量の観測値をあらわしている。



第 4.2 図 2 次モデル

各雑音 w_{1k} , w_{2k} , v_k は, 先の場合と同様に, 相互関係がなく, それぞれ, 平均値が 0, 分散値として,

$$\left. \begin{aligned} E[w_{1k} w_{1j}] &= Q_{1k} \delta_{kj} \\ E[w_{2k} w_{2j}] &= Q_{2k} \delta_{kj} \\ E[v_k v_j] &= R_k \delta_{kj} \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

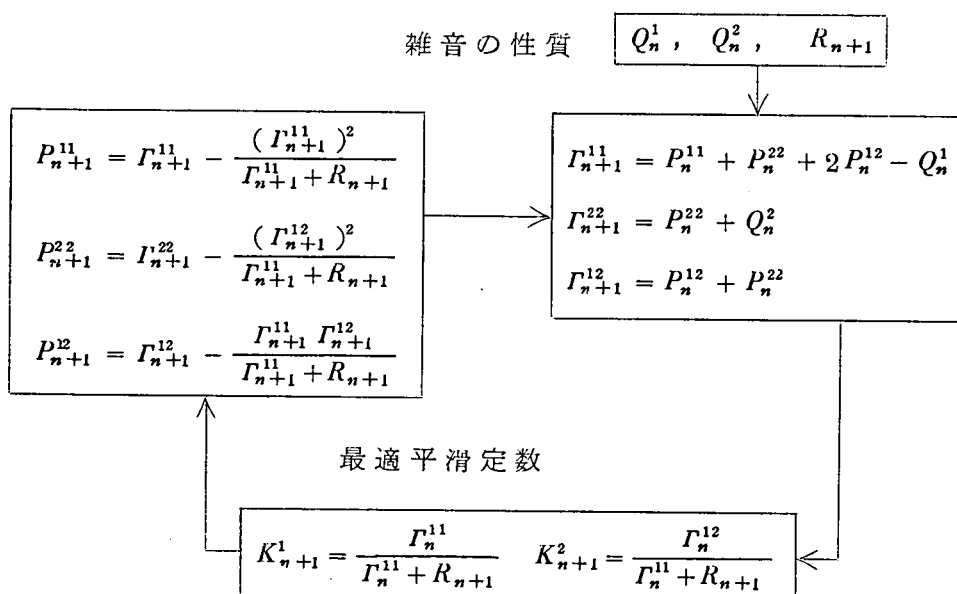
をもつものとするれば, カルマン形予測モデルは,

$$\begin{bmatrix} x_{1k+1}^* \\ x_{2k+1}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1k}^* \\ x_{2k}^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{1k+1} \\ K_{2k+1} \end{bmatrix} \{ y_{k+1} - [1 \ 0] \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1k}^* \\ x_{2k}^* \end{bmatrix} \} \quad (4.10)$$

あるいは,

$$\left. \begin{aligned} x_{1k+1}^* &= (1 - K_{1k+1})(x_{1k}^* + x_{2k}^*) + K_{1k+1} y_{k+1} \\ x_{2k+1}^* &= (1 - K_{2k+1})x_{2k}^* + K_{2k+1}(y_{k+1} - x_{1k}^*) \end{aligned} \right\} \quad (4.11)$$

で与えられる。この形は、変動に傾向因子をもつ、拡張された指数平滑法に対応した形をしているが、この場合平滑定数 K_{1k+1} , K_{2k+1} は一定ではなく、第 4.3 図のようなフローに従って逐次最適値が求められること、および誤差自乗和が最小の保証があることなど、これまでにない優れた特性を有している。しかし、ここでも雑音の大きさ、 Q_{1k} , Q_{2k} , R_k などの値が明らかでない場合には、指数平滑法と本質的に変りはない。



第 4.3 図 最適平滑定数の計算フロー

(3) 一次遅れ特性によるモデル

簡単なプロセスの多くは、可変パラメータをもつ一次遅れ特性で近似される。いま、状態量を x_k , 操作量を u_k , 観測値を y_k とすれば

$$x_{k+1} = a_k x_k + b_k u_k + w_k \quad (4.12)$$

$$y_k = x_k + v_k \quad (4.13)$$

で表現されるような系は現実に少なくない。

系に含まれるパラメータ a_k , b_k は一般に未知で変動する性質があり、状態量 x_k およびパラメータ a_k , b_k などを観測値から推定する問題が生じる。

このような問題において、たとえば、 b_k が未知でゆるやかに変動するという

ような場合には、(4.12)、(4.13)式はあたらしく

$$\begin{bmatrix} x_{k+1} \\ b_{k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_k & u_k \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ b_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_k \\ \xi_k \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$y_k = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_k \\ b_k \end{bmatrix} + v_k \quad (4.15)$$

のように表現され、(2)の場合と同じように、 $k+1$ 時点での状態量およびパラメータの推定値 x_{k+1}^* , b_{k+1}^* は

$$\begin{bmatrix} x_{k+1}^* \\ b_{k+1}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_k & u_k \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k^* \\ b_k^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{1k+1} \\ K_{2k+1} \end{bmatrix} \left[y_{k+1} - [1 \quad 0] \begin{bmatrix} a_k & u_k \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k^* \\ b_k^* \end{bmatrix} \right] \quad (4.16)$$

で与えられる。(17)

K_{1k+1} , K_{2k+1} などの平滑定数は、第4.3図と同様のフローにより、雑音成分の大きさと、 a_k , u_k の変化に応じて逐次もとめられる。

ここでも雑音成分の大きさの推定が、パラメータの推定、状態量の予測、さらにはそれらを用いた制御の良否に重要な要素となることがわかる。

4.3 雑音特性の分離法

前節にみたように、逐次形推定法の利用にあたっては、系の諸雑音の特性の解明が不可欠であり、推定、同定、制御の問題における重要な鍵となる。

十分な分析をおこなわずに、適当な仮定のもとに推定を試みる場合には、便宜的な指数平滑法や、重み係数を適当に選んだ最小自乗法と同等である。したがって、より望ましい推定をおこなうためには何らかの方法で系の諸雑音の性質を推定する必要が生じる。

本節では、観測値時系列から雑音の分散値を定量的に推定する方法について検討する。

4.3.1 システムの記述

以下の検討においては、次のように一般化した線形系

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k \quad (4.17)$$

$$y_k = H_k x_k + v_k \quad (4.18)$$

を考える。

ここに,

$$\begin{aligned}
 x_k &: \text{時刻 } k \text{ における状態量ベクトル } (n \times 1) \\
 u_k &: \text{時刻 } k \text{ における操作量ベクトル } (l \times 1) \\
 y_k &: \text{時刻 } k \text{ における観測量ベクトル } (m \times 1) \\
 A_k &: \text{系パラメータマトリックス } (n \times n) \\
 B_k &: \text{系パラメータマトリックス } (n \times l) \\
 H_k &: \text{観測マトリックス } (m \times n) \\
 w_k &: \text{系固有雑音ベクトル } (n \times 1) \\
 v_k &: \text{観測雑音ベクトル } (m \times 1)
 \end{aligned}$$

である.

また, 系固有雑音 w_k , 観測雑音 v_k は次のような性質を有するものとする.

$$\left. \begin{aligned}
 E[w_k] &= 0 \\
 E[w_k w_j^T] &= Q_k \delta_{kj} \\
 E[v_k] &= 0 \\
 E[v_k v_j^T] &= R_k \delta_{kj}
 \end{aligned} \right\} \quad (4.19)$$

さらに, w_k , v_k はそれぞれ独立であるとし, 状態量の初期状態 x_0 とも相互相関がないものとする.

このような系において, 雑音の分散を与える Q_k , R_k マトリックスの値が未知の場合に, これらを観測値時系列から推定する問題を検討する.

先にみたように, 最適フィルタの設計は, これら Q_k , R_k の値の如何により, 一般にはこれらが明らかにされているとして議論が展開されているが, 現実に適用するにあたっては, Q_k および R_k があらかじめ明らかにされていない場合には, 観測値時系列からこれらを推定することが必要になる.

4.3.2 特性分離の基本式

観測値 y_k にもとづいて, Q_k , R_k を推定する場合に, (4.18) 式の観測方程式における変換マトリックス H_k の性質によって, 種々の方式が考えられる.

(1) H_k が正則行列である場合

状態量がそのまま観測される場合, あるいはそれと同等の独立な情報が観測される場合には, (4.18) 式から

$$x_k = H_k^{-1}(y_k - v_k) \quad (4.20)$$

が導けるから, (4.17) 式は

$$H_{k+1}^{-1}(\mathbf{y}_{k+1} - \mathbf{v}_{k+1}) = A_k H_k^{-1}(\mathbf{y}_k - \mathbf{v}_k) + B_k \mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \quad (4.21)$$

となる。そこで

$$\mathbf{d}_k^1 \triangleq H_{k+1}^{-1} \mathbf{y}_{k+1} - A_k H_k^{-1} \mathbf{y}_k - B_k \mathbf{u}_k \quad (4.22)$$

と定義すれば、(4.21)式から

$$\mathbf{d}_k^1 = \mathbf{w}_k + H_{k+1}^{-1} \mathbf{v}_{k+1} - A_k H_k^{-1} \mathbf{v}_k \quad (4.23)$$

が得られる。

同様に

$$\mathbf{d}_k^2 \triangleq H_{k+1}^{-1} \mathbf{y}_{k+1} - A_k A_{k-1} H_{k-1}^{-1} \mathbf{y}_{k-1} - A_k B_{k-1} \mathbf{v}_{k-1} - B_k \mathbf{u}_k \quad (4.24)$$

を定義すれば

$$\mathbf{d}_k^2 = \mathbf{w}_k + A_k \mathbf{w}_{k-1} + H_{k+1}^{-1} \mathbf{v}_{k+1} - A_k A_{k-1} H_{k-1}^{-1} \mathbf{v}_{k-1} \quad (4.25)$$

が得られる。

ここで、 \mathbf{d}_k^1 、 \mathbf{d}_k^2 はいずれも観測値時系列から算定可能な量であることを考慮すると、雑音は相互に独立と考えて、

$$\begin{aligned} E[\mathbf{d}_k^1 \mathbf{d}_{k+1}^{1T}] &= -A_k H_k^{-1} E[\mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^T] (H_k^{-1})^T \\ &= -A_k H_k^{-1} R_k (H_k^{-1})^T \end{aligned} \quad (4.26)$$

$$E[\mathbf{d}_k^2 \mathbf{d}_{k-1}^{2T}] = A_k E[\mathbf{w}_{k-1} \mathbf{w}_{k-1}^T] = A_k Q_{k-1} \quad (4.27)$$

が導ける。ここに \mathbf{d} は行列 \mathbf{d} の置換行列である。

すなわち、 Q_k 、 R_k は、それぞれ(4.26)、(4.27)式の左辺の期待値を計算することによって求められる。

\mathbf{d}_k^1 、 \mathbf{d}_k^2 は、(4.22)、(4.24)式から算定できるから、 $E[\mathbf{d}_k^1 \mathbf{d}_k^{1T}]$ 、 $E[\mathbf{d}_k^2 \mathbf{d}_k^{2T}]$ を時間に関する平均値と考えれば、 k 時点までの観測値時系列から、 Q_{k-1} 、 R_k が求められる。

なお、(4.27)式の代りに \mathbf{d}_k^1 だけを用いて、

$$\begin{aligned} E[\mathbf{d}_k^1 \mathbf{d}_k^{1T}] &= E[\mathbf{w}_k \mathbf{w}_k^T] + H_{k+1}^{-1} E[\mathbf{v}_{k+1} \mathbf{v}_{k+1}^T] \\ &\quad + A_k H_k^{-1} E[\mathbf{v}_k \mathbf{v}_k^T] (A_k H_k^{-1})^T \\ &= Q_k + H_{k+1}^{-1} R_{k+1} + A_k H_k^{-1} R_k (A_k H_k^{-1})^T \end{aligned} \quad (4.28)$$

により、(4.26)式と併せて Q_k 、 R_k を同様に求めることも可能である。方式による差異や用いるべきデータの長さなどについては、次節の実験結果の項で検討する。

(2) $m > n$ で H_k が rank n のとき

独立な観測値の数が状態量の数よりも多いときには、それらの中から n 個の

情報だけを利用することもできるが厳密には、(4.20)式の H_k^{-1} に代って、擬逆行列 (Pseudo Inverse Matrix) を考え、これを

$$H_k^+ \triangleq (H_k^T H_k)^{-1} H_k^T \quad (4.29)$$

のように定義すれば、(4.18)式から

$$x_k = H_k^+ (y_k - v_k) \quad (4.30)$$

となって、(1)の場合と同様にして、

$$Q_{k-1} = A_k^{-1} E[A_k^2 A_{k-1}^2{}^T] \quad (4.31)$$

$$R_k = - (A_k H_k^+)^{-1} E[A_k^1 A_{k-1}^1{}^T] (H_k^+)^T \quad (4.32)$$

ただし、

$$A_k^1 \triangleq H_{k+1}^+ y_{k+1} - A_k H_k^+ y_k - B_k v_k \quad (4.33)$$

$$A_k^2 \triangleq H_{k+1}^+ y_{k+1} - A_k A_{k-1} H_k^+ y_{k-1} - A_k B_{k-1} v_{k-1} - B_k v_k \quad (4.34)$$

が導ける。

(3) $m < n$ で H_k が rank m の場合

独立な観測値の数が状態量の数より少ない場合が現実には少なくない。もとより、より確度の高い推定のためには、より多くの独立な観測がなされることが望ましいが、 H_k が $m \times n$ ($m < n$) 行列の場合の雑音特性の分離は次のようにして可能になる。

この場合には、 x_k を H_k の逆行列を用いて直接求めることはできないから、各変数を変換行列により、次のように $m \times m$ 行列を基本とする系に変換する。

すなわち、(4.17)、(4.18)式を

$$\begin{bmatrix} X_{k+1}^1 \\ X_{k+1}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_k^1 & A_k^2 \\ A_k^3 & A_k^4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_k^1 \\ X_k^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_k^1 \\ w_k^2 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

$$Y_k = [H_k^1 \quad 0] \begin{bmatrix} X_k^1 \\ X_k^2 \end{bmatrix} + v_k \quad (4.36)$$

のように変換する。

ここに、 H_k^1 は $m \times m$ の正則行列、 X_k^1 、 w_k^1 、 Y_k 、 v_k は $m \times 1$ のベクトル、 X_k^2 、 w_k^2 は $(n-m) \times 1$ のベクトルである。なお、(4.35)式においては、(4.17)式における B_k 、 v_k の項を以下の検討における式の簡単化のために省略しているが、 v_k は操作量、 B_k は系パラメータであり、いずれも時刻 k においては算出可能な既知定数であって、これらの項がある場合には(4.22)、(4.24)式からもわかるように観測値 Y_k にともなう算出可能な項が増加した形で処理

される。

このような変換は，正則変換行列 $T_1 (n \times n)$ ， $T_2 (m \times m)$ を用いて $X_k = T_1^T x_k$ ， $Y_k = T_2^T y_k$ のような変換を行なえば，観測方程式は，

$$Y_k = T_2 H_k T_1^{-1} X_k + T_2 v_k \quad (4.37)$$

となり，

$$T_2 H_k T_1^{-1} = [H_k^1 \quad 0] \quad (4.38)$$

となるように変換行列 T_1 ， T_2 を選ぶことによって実現できる。

さて，(4.36) 式から

$$X_k^1 = H_k^{1-1} (Y_k - v_k) \quad (4.39)$$

が得られるから，これを (4.35) 式に代入すれば

$$X_{k+1}^2 = A_k^1 X_k^2 + A_k^3 H_k^1 Y_k + w_k^2 - A_k^3 H_k^{1-1} v_k \quad (4.40)$$

$$H_{k+1}^{1-1} Y_{k+1} - A_k^1 H_k^{1-1} Y_k = A_k^2 X_k^2 + w_k^1 + H_{k+1}^{1-1} v_{k+1} - H_k^{1-1} v_k \quad (4.41)$$

となるが，これは，新しく $(n-m)$ 個の状態量 X_k^2 に対して m 個の観測値のある方程式となる。

したがって， $n-m \leq m$ の場合には，(4.41) 式から X_k^2 を求め，それを (4.40) 式に代入することにより，(1)，(2) の場合と同様に観測値および系の諸定数だけの関係式がえられる。したがって，雑音成分を除いて観測値時系列からなる d_k^1 を先の場合と同様に定義すれば， d_k^1 の相関関数 $E[d_k^1 d_{k-2}^{1T}]$ ， $E[d_k^1 d_{k-1}^{1T}]$ ，および $E[d_k^1 d_k^{1T}]$ から， $E[v_k v_k^T]$ ， $E[w_k^1 w_k^{1T}]$ および $E[w_k^2 w_k^{2T}]$ が順次導ける。

$n-m > m$ の場合には再び同様のプロセスを繰り返すことによって，雑音の分離が可能になる。

4.3.3 数値列

(I) 次のような線形一次式

$$x_{k+1} = x_k + w_k$$

$$y_k = x_k + v_k$$

においては，

$$d_k^1 = y_{k+1} - y_k$$

$$d_k^2 = y_{k+1} - y_{k-1}$$

となつて，(4.26)，(4.27) 式から

$$Q_{k-1} = E[d_k^2 d_{k-1}^2]$$

$$R_k = -E[D_k^1 D_{k-1}^1]$$

が得られる。

$E[D_k^2 D_{k-1}^2]$, $E[D_k^1 D_{k-1}^1]$ として、時間に関する平均値

$$\sum_{i=k-N}^{\infty} [(y_{i+1} - y_{i-1})(y_i - y_{i-2})], \quad \sum_{i=k-N}^{\infty} [(y_{i+1} - y_i)(y_i - y_{i-1})]$$

をそれぞれ計算して利用できるものとすれば、雑音成分の分散値 Q_k , R_k が独立に分離、算出できる。

N としては、 Q_k , R_k が時間によって変化しない場合には十分大きな値をとることが望ましいが、変動する場合には、比較的近傍のブロックから $E[D_k^1 D_{k-1}^1]$, $E[D_k^2 D_{k-1}^2]$ を算出して、

$$Q_{k-1} = (1-r) Q_{k-2} + r E[D_k^2 D_{k-1}^2] \quad (4.42)$$

$$R_k = (1-r) R_{k-1} + r E[D_k^1 D_{k-1}^1] \quad (4.43)$$

のような平滑形の表現でおきかえることが考えられる。 r は、 $0 < r < 1$ の平滑定数である。

(II) $m < n$ の例として

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_{1k+1} \\ x_{2k+1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1k} \\ x_{2k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} w_{1k} \\ w_{2k} \end{bmatrix} \\ y_k &= [1 \quad 0] \begin{bmatrix} x_{1k} \\ x_{2k} \end{bmatrix} + v_k \end{aligned}$$

のような場合を考える。

$$x_{1k} = y_k - v_k$$

であらわされるから、 x_{2k+1} は

$$x_{2k+1} = x_{2k} + w_{2k}$$

および

$$y_{k+1} - y_k = x_{2k} + w_{1k} + v_{k+1} - v_k$$

であらわすことができ、

$$D_k^1 \triangleq (y_{k+1} - y_k) - (y_k - y_{k-1})$$

と定義すれば

$$D_k^1 = w_{2k-1} + (w_{1k} + v_{k+1} - v_k) - (w_{1k-1} + v_k - v_{k-1})$$

となつて、

$$\left. \begin{aligned} E[d_k^1 d_{k-2}^1] &= R_{k-1} \\ E[d_k^1 d_{k-1}^1] &= -Q_{1k-1} - 2R_k - 2R_{k-1} \\ E[d_k^1 d_k^1] &= Q_{2k-1} + Q_{1k} + R_{k+1} + 4R_k + R_{k-1} \end{aligned} \right\} \quad (4.44)$$

から順次、 R_k 、 Q_{1k} 、 Q_{2k} を求めることができる。

4.4 実験結果

4.4.1 系固有雑音と観測雑音の分離

最も基本的な場合として、4.3.3の例(I)の定常モデルについて系固有雑音と観測雑音の分散値の推定を行なった結果が、第4.4図である。

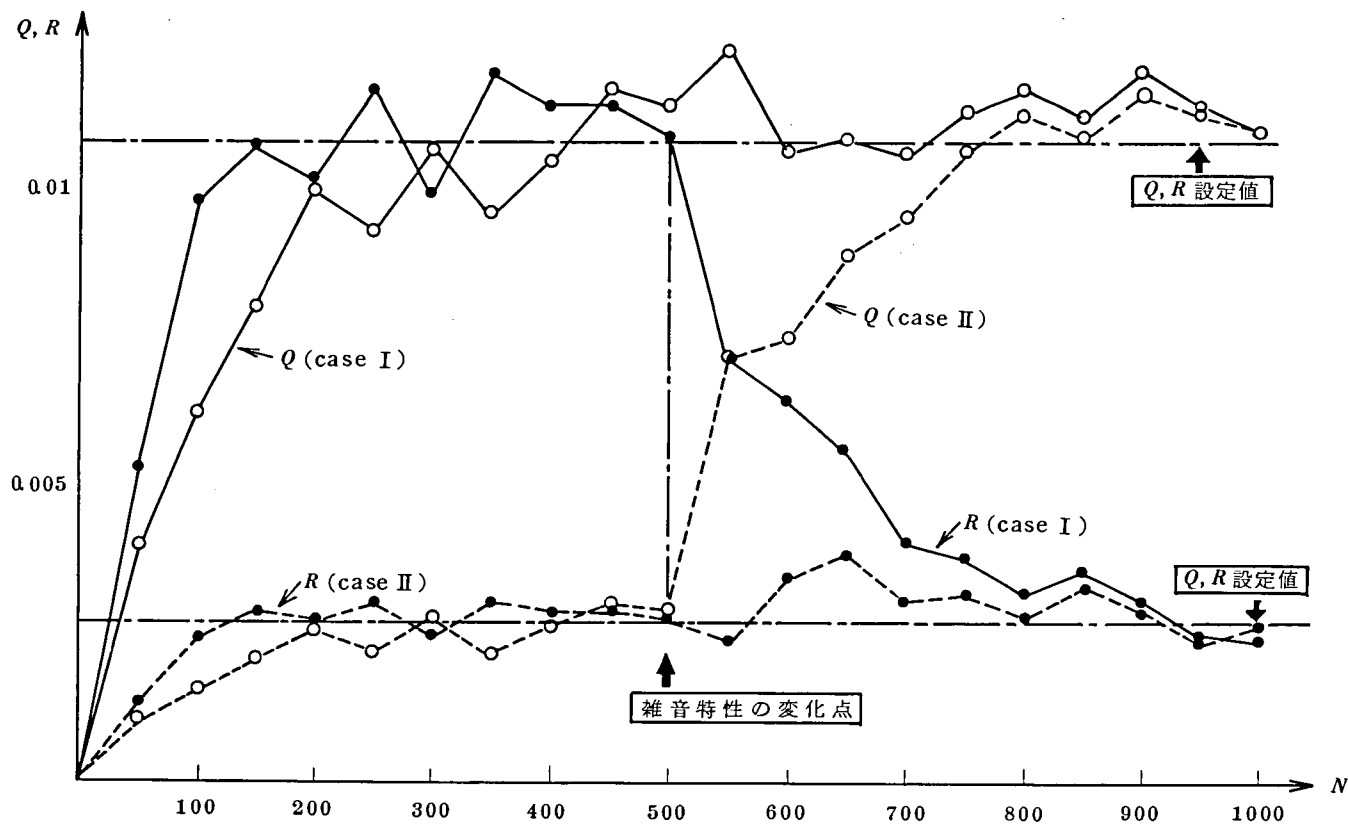
実験は計算機によりあらかじめ分散のわかっている正規雑音を w_k 、 v_k として加え、観測値時系列 y_k を逐次発生させて、それから本章で述べた方法によってそれぞれの雑音の分散値 Q_k 、 R_k を推定したものである。

分散の推定式としては、(4.42)、(4.43)式の平滑形の式を用い、初期推定値を0として過渡的な推定の推移を図は示している。

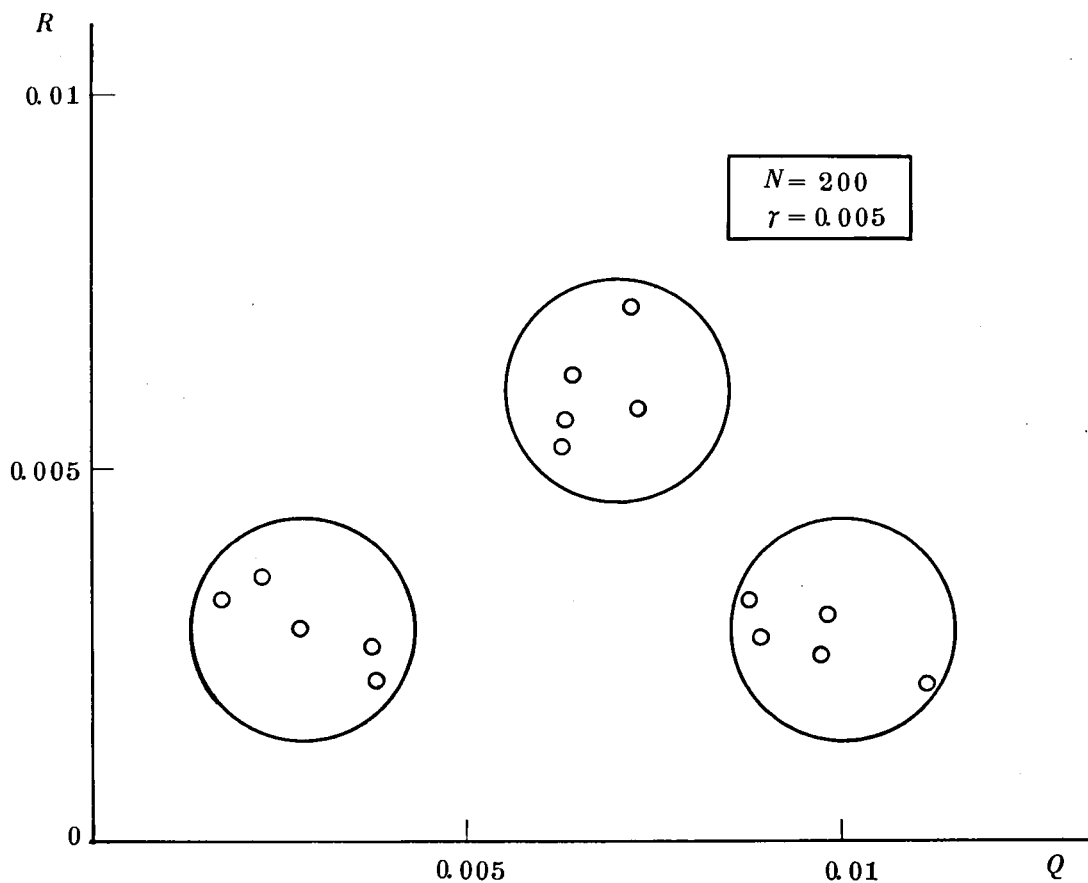
平滑定数 r の選定は、過渡特性の追従性と定常状態における安定性に大いに関係する。第4.4図では r は0.005に選んであるが、雑音特性の変化に対する応答も非常によく、振動性も少ない。 N はサンプリングのデータ個数を示しているが、200～300個のデータで十分設定値に近づけることができることがわかる。

第4.5図は、 $N=200$ の時点において、推定値の真値に対するばらつきを示したものである。すなわち、推定実験を繰り返して、雑音の組合せ、雑音母集団をそれぞれ異にして推定を試みたものであるが、ばらつきの程度はほぼ一様である。

なお、 Q_k 、 R_k の推定にあたって、 d_k^1 、 d_k^2 ((4.22)、(4.24)式)の選び方により、何種類かの方法が考えられることを前節に示したが、実験の結果では、推定結果に特に差異は認められなかった。これは、擬似的に発生させる雑音の相関の程度によって実際には多少の差異が生じる可能性があるが、原理的には等価であり、より簡単な推定式の選定で十分であると思われる。



第 4.4 図 雑音特性が変化する場合の分散値分離推定結果



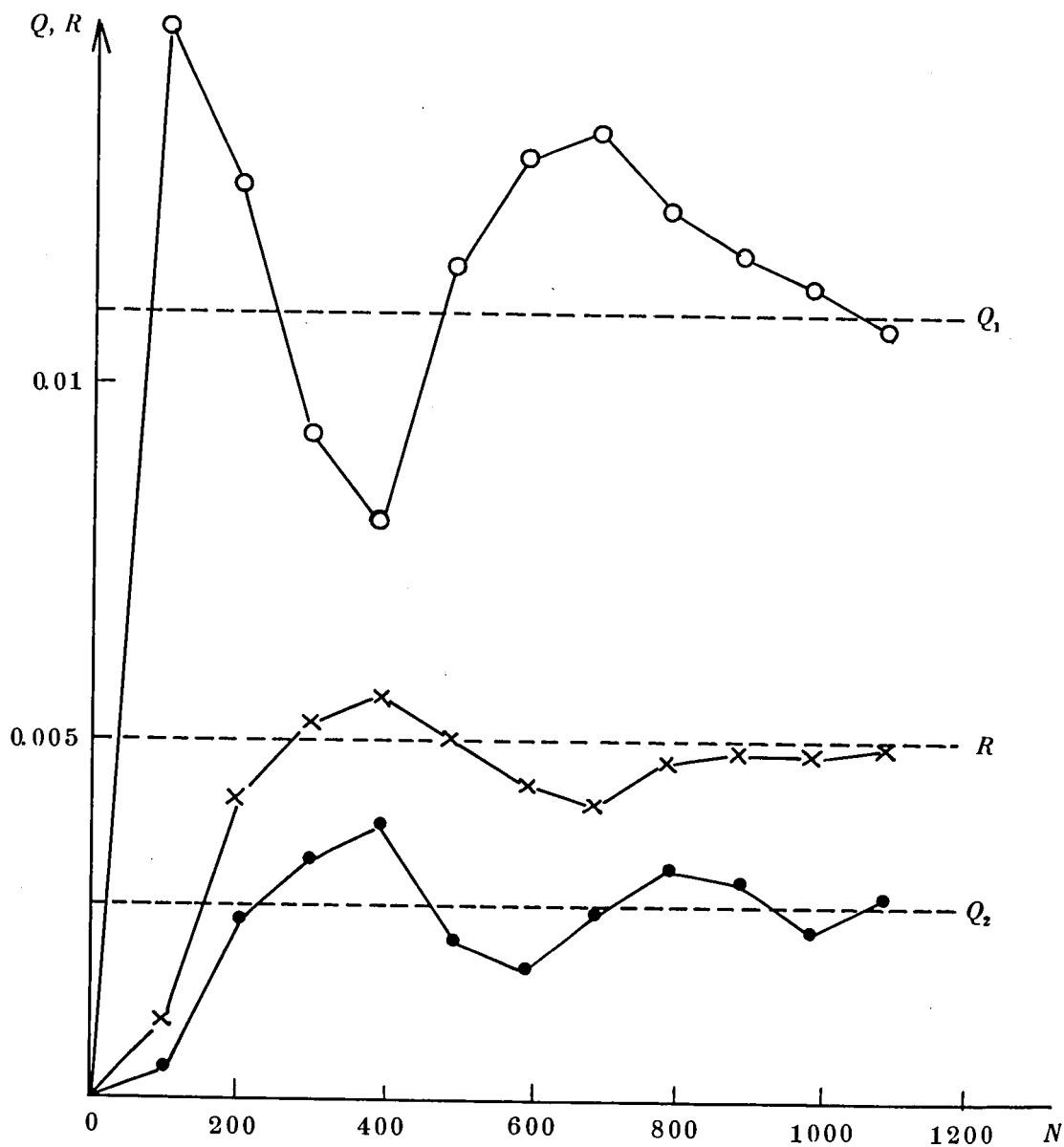
第 4.5 図 雑音分散値推定結果のばらつき

4.4.2 3種の雑音の分離

状態量が2個，観測値が1個の，例(Ⅲ)の場合には， Q_{1k} ， Q_{2k} ， R_k の3種の雑音分散値を推定，分離することになる．第4.6図は実験の結果の一例である．

この場合には，観測値に含まれる雑音成分は多重にかさなっているため，過渡的にやや不安定で，安定な定常状態にいたるまでに，2種の雑音分散値を推定する場合にくらべて2～3倍のデータ量が必要である．

しかし，この場合も，後で述べるように，雑音特性分離の効果は，直接的にはそれを用いた状態量の推定誤差によって評価されるので，その意味では，分



第 4.6 図 3 種の雑音特性分離実験結果

離の効果は十分早い時点で期待できる。

4.4.3 推定誤差に対する効果

雑音の分散値の推定は、直接、状態量の推定誤差によって評価される。

第 4.7 図は、本文で述べた方法により推定した雑音分散値を用いて逐次形推定法により状態量の推定をおこなった場合の推定誤差

$$P_k = E[(x_k^* - x_k)^2] \quad (4.45)$$

を、例 (I) のモデルについて述べたものである。

比較のために、雑音分散値が既知の場合のカルマンフィルタによる推定結果と、平滑定数を適当に選んだ場合の指数平滑法による推定誤差とを併せて示した。

雑音分離機構を併用した適応形の逐次推定法により、雑音の変化に対しても非常に良好な推定が可能であることがわかる。また、過渡現象の安定化も十分早い時点で期待できることがわかる。

指数平滑法による推定はその係数を最適に選ぶ場合には、十分よい推定が可能であるが、雑音の変化に対しては、誤差が大きくなることは避けられない。

誤差自乗和最小の保証のあるカルマン形推定は、雑音の大きさが既知の場合には望ましいが、適当な仮定のもとで利用する場合には、実際の推定誤差^{(19),(21)}は大きくなる。本文で述べた適応形逐次推定法により、それが改善されることが明らかである。

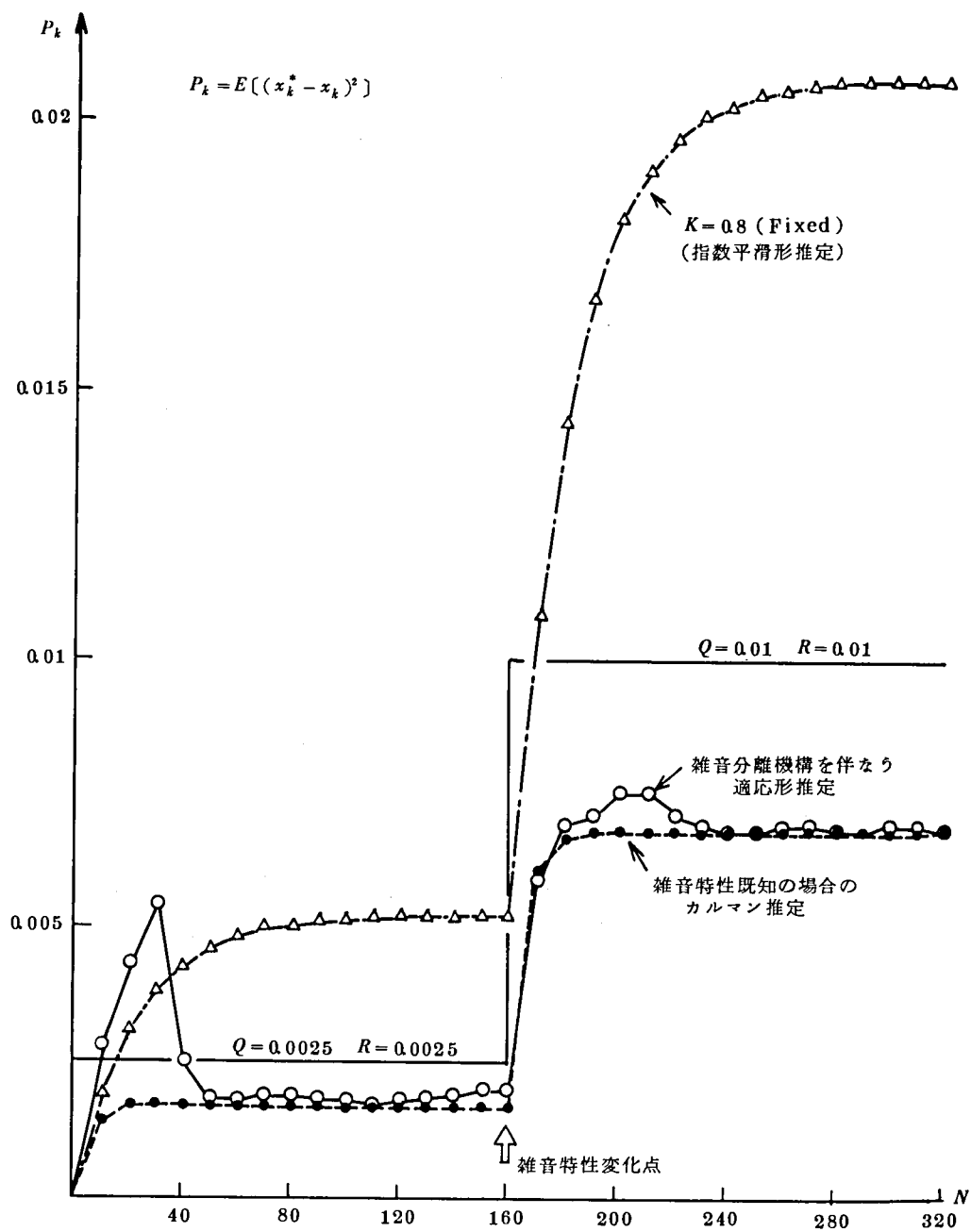
4.5 結言

本章では、逐次形推定法を現実のプロセスのオンライン制御に適用する場合に重要な鍵となる、系の雑音特性の把握の方法について検討した。すなわち観測値時系列から系固有雑音ならびに観測雑音の分散値を分離、推定する雑音特性分離機構を新しく開発し、これを併用することにより、雑音特性が変化する系においても、適応形の逐次推定が可能であることをシミュレーションによる実験により確かめた。

本章で得た主要な結論は次のとおりである。

(1) 逐次形推定法の有効性を、現実のプロセス制御で直面する一般的な 2, 3 の問題の定式化により示した。純推定問題、系未知定数の同定問題などが含まれる。

(2) しかし、これらは、あらかじめ系に含まれる雑音の性質が明らかであることを前提としており、実用にあたっては観測値時系列からこれらの雑音特性を分離、推定することが必要になる。



第 4.7 図 推定誤差評価の比較

(3) そこで、新しく雑音分離方式を提案し、観測量と状態量の数、いいかえれば観測マトリックスの性質に応じて、それぞれ、離散形線形系に対して一般的に議論した。

(4) この方式が唯一の方法ではなく、かつ最上であるという保証はないが、2, 3の考えうる異なる手法に対して、ほぼ同一の分散値推定結果を得た。結果は、非常に良好であり、雑音特性の変化に対しても十分な応答を示している。

(5) さらに、分散値推定の効果を、直接、状態量推定誤差として評価し、平滑定数を固定した指数平滑法や、雑音特性を適当に仮定したカルマン形推定と比較して、本方式のすぐれていることを確かめた。

第5章 相模川水系集中管理システムの運用

5.1 緒言

前章までに、水系集中管理のために必要とされる基本的ないくつかの問題を、特にオンライン制御という観点から検討してきたが、本章ではそれらの背景となった神奈川県相模川水系における水系集中管理システムの運用について、その概要を述べる。

相模川水系集中管理システムは、テレメータ、通信網、ならびに電子計算機システムから構成され、流域の水位、雨量、ゲート開度、発電電力量などを中央に収集し、それらにもとづく水系の状況の把握と計算機による制御指令の伝達を目的としたものであり、昭和42年4月から稼動を開始し、現在に至っている。

システム設置の目的は、防災ならびに水資源の有効利用にあるが、特に、急激に増大する水需要問題を含めた水系の運用方式検討が大きな課題とされたところに特徴がある。

システムの運用にあたっては、次のような諸問題を検討した。

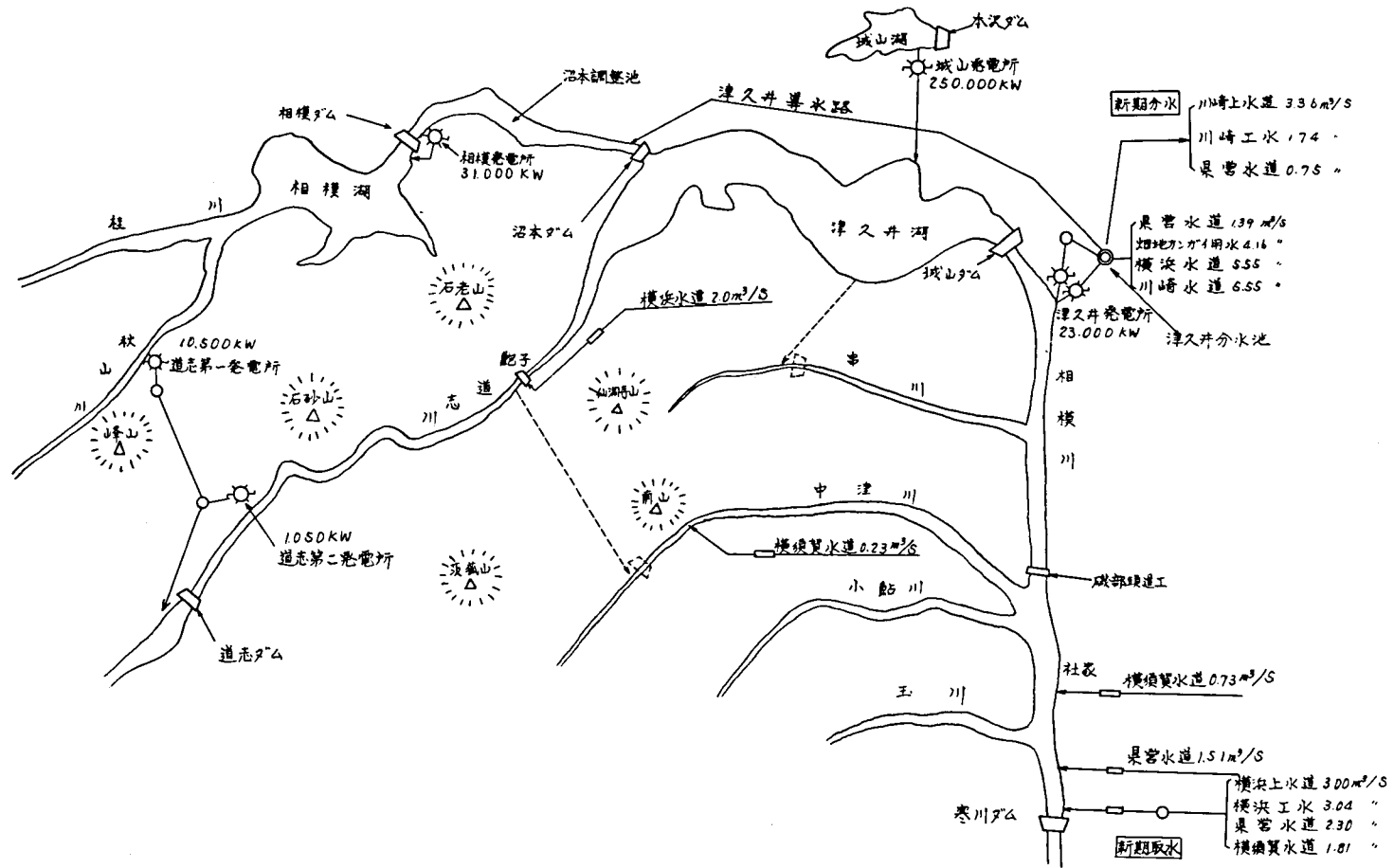
- (1) 多目的ダムの総合運用方式
- (2) 洪水時のダムゲート制御
- (3) 平常時の水力発電量制御
- (4) 発電所運転計画の自動化
- (5) データロギングならびにデータ管理

以下に、それぞれの項目について、解析、実験、実施結果などについて概要を記述する。

水系の管理、制御については、建設省をはじめ各方面で検討され、部分的に制御機構が設置されているが、ここで述べるように、中規模なデジタル計算機を中心とした集中管理は、我が国ではじめてのものであり、その運用は各方面から注目されている。

以下の説明のために、対象とした相模川水系の概念図ならびに、構成図を第5.1図、第5.2図に示す。

相模川はその源を富士東麓に発し、河口湖、山中湖および西湖とは人工水路



第 5.1 図 相模川水系概念図

で結ばれ、富士吉田附近で合流して上流では桂川とよばれている。大月では笹子峠から下る笹子川、猿橋では大菩薩の山頂から流れる葛野川と合流して相模川となり、相模湖に注ぐ。

さらに、相模ダム、相模発電所を経て、道志川と合流し、昭和41年に完成した城山ダムに流れ、神奈川県中央部を南下して相模湾に注いでいる。

城山ダム下流には、中津川はじめ二、三の小支川があり、取水調整池として寒川ダムが建設され、横浜、川崎を含む神奈川県の水需要をまかなっている。

本プロジェクトでは、相模ダム、城山ダムを中心とした水系の運用問題を管理の対象とした。相模ダム上流には東京電力の管理下にある小規模な発電所があるが、これらは特に大きな影響をもたないので、相模湖上流を自然河川として取扱っている。また、城山ダムに近接して東京電力の揚水発電所（最大出力250 MW）の運用に関しては検討していない。

5.2 多目的ダムの総合運用方式

貯水池運用の問題は、古くから電力会社を中心に、主として水力発電の効率運用という立場からその運用が論じられ、現実にそれらを土台とし、かつダム管理担当者の多年の経験にもとづいてダム操作規程がつくられ、管理、運用されている。

しかし、多目的ダムにおいては、貯水池は水エネルギーの有効利用という目的の他に、農業用水、水道用水、工業用水などの取水の確保、ならびに洪水調節という大きな目的をもっており、昨今では社会機構の変化にともない、前者よりもむしろ後者に重点がおかれるべきであると云える。

そこで、水系総合管理の諸方式を検討するにあたり、まず基本となる貯水池の年間運用の問題を整理することから検討を開始した。

5.2.1 確保貯水量の算出

電力の高効率運用の検討よりもまず、水需要に対して、如何に水が確保されるべきかという問題を検討する。

水需要の年間変動は、農業用水の取水権あるいは水道用水などの計画取水量からほぼ把握できる量である。一方、貯水池への流入量は、確定的に予測することはむづかしく、統計的な取扱いをよぎなくされる。

したがって、年間を通じて必要な水需要をまかなうために貯水池はどれくら

いの貯水量を各期に確保しておくべきかは確率的に表現される。

いま、一年を旬単位に 36 期に分割し、 i 期の流入量、取水量をそれぞれ J_i , Q_i ($i = 1, 2, \dots, 36$) とすれば、 i 期の貯水量 S_i は、

$$S_i = S_{i-1} + J_i - Q_i \quad (5.1)$$

で与えられる。ただし S_i は、貯水池の上限、下限を S_{\max} , S_{\min} として

$$S_{\min} \leq S_i \leq S_{\max} \quad (5.2)$$

の制限がある。

流入量 J_i は確率的な量であり、したがって貯水量 S_i も確率的に変化する。

一般に、確率密度関数 $P_1(x_1)$, $P_2(x_2)$ をもつ二つの確率変数 x_1, x_2 の合成確率密度関数は、

$$P(X = x_1 + x_2) = \int_{-\infty}^{\infty} P_1(X - x) P_2(x) dx \quad (5.3)$$

で与えられるから、貯水池の上下限を考慮しない場合には、 i 期末の貯水量の確率密度関数 P_S^i は、 P_f^i を i 期流入量の確率密度関数として、

$$P_S^i(X = S_{i-1} + J_i - Q_i) = \int_{-\infty}^{\infty} P_S^{i-1}(X + Q_i - x) P_f^i(x) dx \quad (5.4)$$

であらわされる。

(5.2) 式による貯水池制限を考慮すれば、

$$\left. \begin{aligned} P_S^i(X = S_{\min}) &= \int_{-\infty}^{S_{\min}} P_S^{i-1}(X + Q_i - x) P_f^i(x) dx \\ P_S^i(S_{\min} < X < S_{\max}) &= \int_{S_{\min}}^{S_{\max}} P_S^{i-1}(X + Q_i - x) P_f^i(x) dx \\ P_S^i(X = S_{\max}) &= \int_{S_{\max}}^{\infty} P_S^{i-1}(X + Q_i - x) P_f^i(x) dx \end{aligned} \right\} \quad (5.5)$$

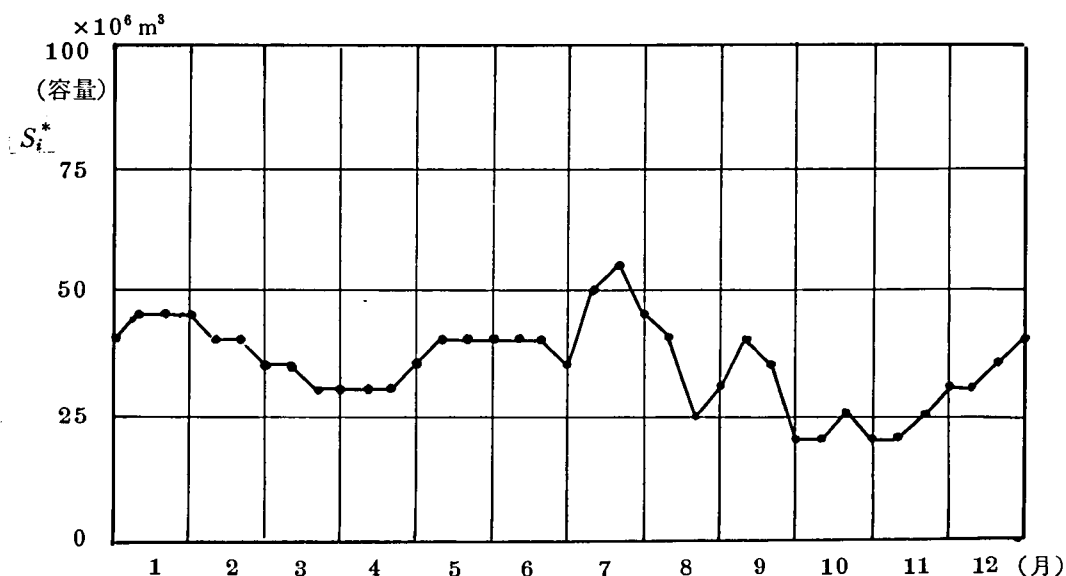
で与えられる。 $P_S^i(X = S_{\min})$, $P_S^i(X = S_{\max})$ は i 期における渴水確率、溢水確率を示している。

したがって、初期貯水量を S_0 とすれば、そこから出発して (5.5) 式により順次、各期の貯水量の確率分布が求められ、同時に、貯水池が下限を下まわる確率すなわち渴水確率が求められる。

したがって、 i 期の貯水量 S_i^* を初期値として、 $i + 36$ 期まで、厳密にはさらに長期に、 i 期以降の各期の渴水確率を計算して、その最小値が、許容渴水確

率をちょうど満足させるとき、 S_i^* は第 i 期において確保されるべき貯水量と云える。

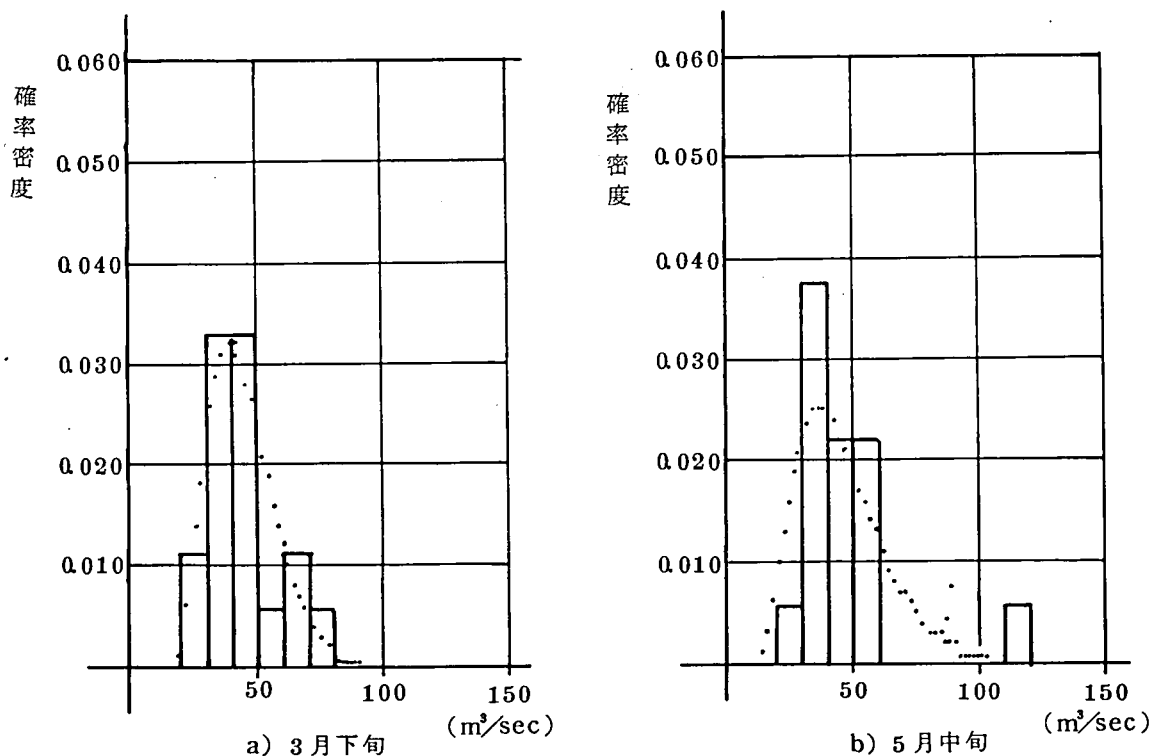
このような考えのもとに、確保貯水量を求めたものが第 5.3 図である。図は、相模ダム、城山ダムを合成した一つの貯水池と考えて、水需要と流入量の関係から、確率 0.1 で貯水池が空になる可能性のある限界値を示している。



第 5.3 図 両ダム総合の確保貯水量 (渇水確率 0.1)

このような計算のために、各期の流入量分布を与える必要がある。ダム流入量の分布⁽⁴⁰⁾に関しては、これまでに Foster, 岩井⁽²⁾らによって種々の分布曲線が提案されているが、ここではデータ量が 20 年間余りしか利用できないことをも考慮に入れて、パラメータの数が少なく、かつ比較的うまく近似できるとと思われるガンマ分布で近似した。第 5.4 図に流入量分布のデータとその近似曲線を示している。なお、計算機による数値計算にあたっては極端に離れたデータなどは、部分的修正を加えている。

以上のように、本プロジェクトでは統計的な取扱いによって確保貯水量を決め、これを貯水池運用の下限とした。もとより、分布曲線の妥当性、および各期の流入量分布を独立と考えていることなど問題は残るが、現実に利用可能な



第 5.4 図 ダム流入量の分布曲線

データによる一つの考え方である。

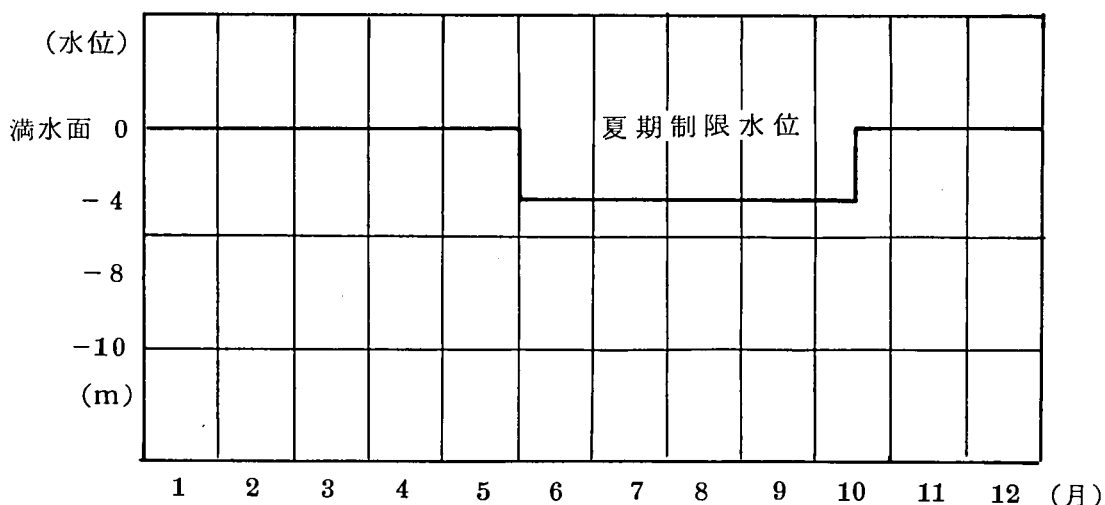
確保貯水量の算出に関しては、過去のデータを直接用いてシミュレーションの形で水収支計算を行ない、過去の流入状況に対して保証する現実的な方法が考えられるが、流入量の分布に大きな誤差がない限りにおいては、本方式は、統計的により厳密な取扱いをしていることになる。

5.2.2 出水期制限水位

貯水池運用の上限を与えるものとして、異常出水に備えて出水期にはあらかじめ貯水池水位を低くしておくことがこれまでから規則化されている。

どの程度水位を低くしておくべきかは、出水時のゲート放流能力、制御方式、予測の誤りの危険性、水位低下による損失などを勘案して定められるべきであるが、この問題は旬単位の巨視的な運用問題というよりも、さらに時間軸の短い運用問題と考えられるので、次節で述べる洪水時運用において検討する。

したがって，ここでは従来から規定されている夏期制限水位を上限として貯水池運用の問題を考える．夏期制限水位の妥当性は洪水時運用からの要求として検討できる．第 5.5 図は，現行の夏期制限水位（城山ダム）を参考までに示したものである．これは計画洪水とダム放流能力の関係から，ダム設計時に，巨視的な計算にもとづいて定められたものである．



第 5.5 図 夏期制限水位（城山ダム）

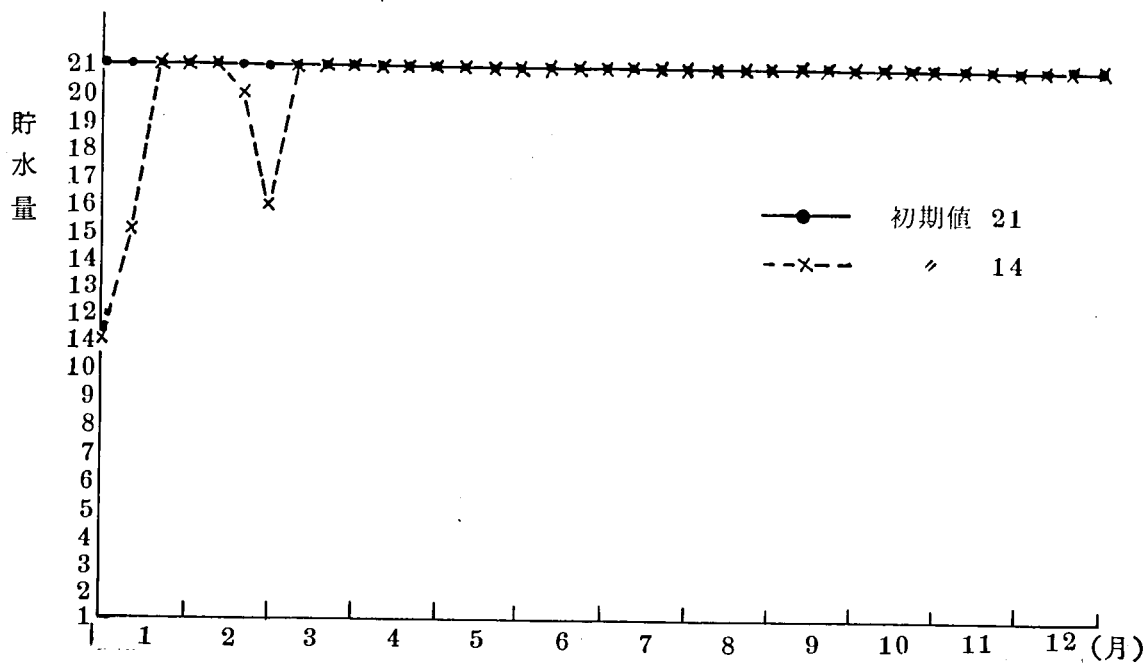
5.2.3 貯水池最適運用曲線

貯水池運用の問題は，よく知られているように，多段決定の問題として，たとえば，ダイナミックプログラミングなどによって最適解が求められる．

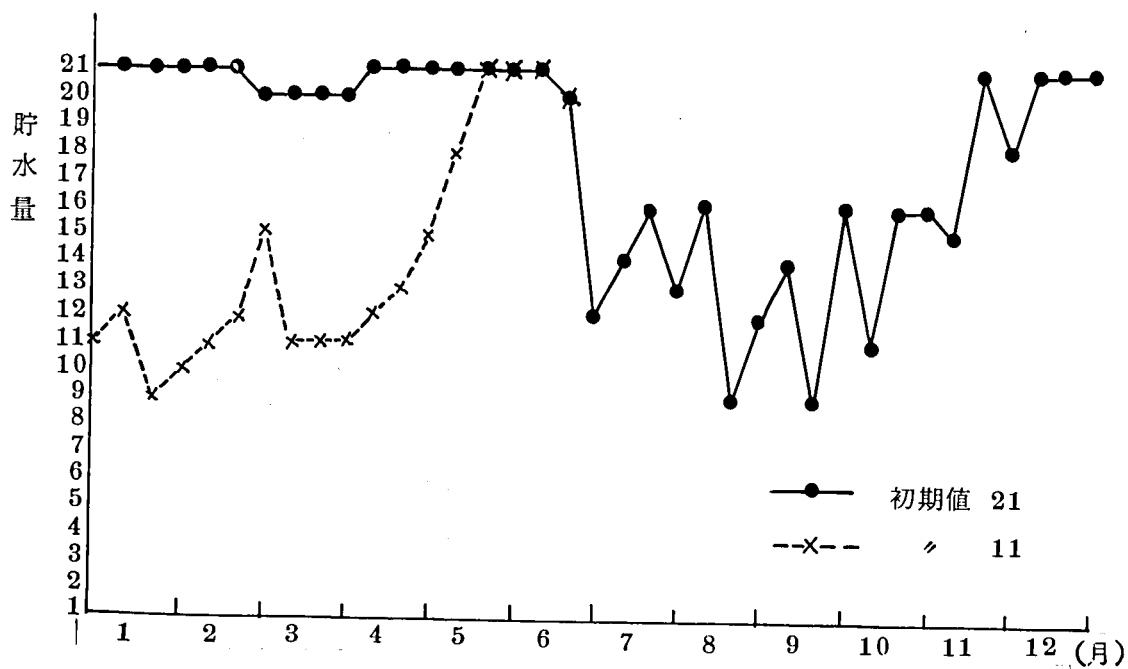
相模，城山両ダムにおいても，連水系の貯水池運用問題として，ダイナミックプログラミングによる最適解を従来の運用と比較検討する意味で算出した．

通常，水力発電を中心とした最適運用曲線の算出には，系統内火力の費用といった評価関数が用いられるが，相模水系では水力発電所が県側に所属し，年間総発電量という形で電力会社と契約されていることを考え合せて，水系内の総有効発電量最大を評価として用いて，最適計算をおこなった．

計算にあたっては，年間を^{1月から12月まで}36期に分割し，両ダムの貯水量をそれぞれ20区分にして，二次元のDP計算をおこなった．結果を第 5.6 図に示す．



a) 相模ダム



b) 城山ダム

第 5.6 図 貯水池最適運用曲線

計算の結果では、相模、城山の連水ダムにおいて、上流側に位置する相模ダムは、高水位運用、下流側の城山ダムは取水を吸収する調整ダムとして利用されることの妥当性を示している。これは、両ダムにそれぞれ結ばれる相模発電所、津久井発電所の発電効率の問題ともからむが、従来から運用されている連水系の上側ダムは高水位運用という方式を、計算で裏づけたことになる。

最適計算に用いる流入量は、計算の単純化のために、流入量平均値を用いた。厳密には期待値最大の形で取り扱うか、あるいは流入量変化による感度解析などを併用して最終的な運用曲線を決定する必要があるが、本プロジェクトではそこまでの検討はおこなっていない。

長期運用の問題は基本的な運用方針として全体の傾向をとらえることに意味があり、必ずしも厳密な計算が意味をもつものではない。本プロジェクトでは以下の諸問題の検討の参考としてこの問題を取り扱うにとどめている。なお、このほか、貯水値の運用方針決定の補助的な役割をはたすものとして、両ダム運用のシミュレータを作成し、運用に役立てている。

以上のように、相模、城山両ダムの長期運用方式の決定に際して考慮した項目は、通常用いられているダム操作方式に比して、次のような特長をもっていると云える。

- (1) 系統内発電費用最小という電力会社による最適運用方式をとらずに、多目的ダムの大きな課題である取水確保、洪水防止の二つの制約のもとで、年間総有効発電量最大という目的関数による最適運用曲線を算出した。この目的関数は、水系管理が地方自治体に属しており、電力会社との契約が総発電量という基準によっていることから、そのまま、評価の基準とした。
- (2) 取水量確保を、ダム流入量の統計的な処理により確率的に保証された確保貯水量という形で与えた。通常用いられている過去の流入量データにもとづく水収支計算による確保貯水量の算出に比べて、長期的にみて統計的により厳密な取扱いをしていることになる。
- (3) 計算機を利用して、相模、城山両ダムに対し、旬単位にダイナミックプログラミングによる離散的な最適運用曲線を作成し、いかなる時点においても、現在の貯水量を始点にして、将来の最適な運用曲線を示すグラフを用意した。もとより、統計的な処理による旬単位の年間運用曲線はあくまで貯水池運用の一つの基本指針であって、現実のダム操作は、さらに短期の流入量予測、電力

負荷の変動を考慮した日間運用などにより修正される性質のものである。これらについては、次節以下でふれる。

5.3 洪水時のダムゲート制御

我が国の貯水池は一般にその容量はそれほど大きくはなく、一度び豪雨による出水があると、貯水池の運用は防災の意味から非常にきめの細かい制御が必要とされ、ダムゲート制御は各ダム管理事務所にとって緊急業務となる。

貯水池は洪水調節の目的をもつのが普通であるが、それと同時に、水力発電の高効率運用、各種水需要に対する用水の確保という大きな目的をもっており、単に出水の可能性があるというだけで貯水池の水を放流することは許されない。より確かな予測にもとづく安全かつ無駄のない放流制御が望まれる。

もとより現実には、経験豊かなダム管理担当者の総合的な判断によって、適切な処置がとられているが、昨今の水資源開発により多数のダムが同一水系内に建設され、単に一つのダムの操作、運用だけではなく、いくつかのダム群の協調運用、さらにはダム下流から河口に至る河川管理を統合したダム制御方式の検討が必要とされるに至っている。

本節では、計算機の実時間利用を前提として洪水時のダムゲート制御の問題を検討する。

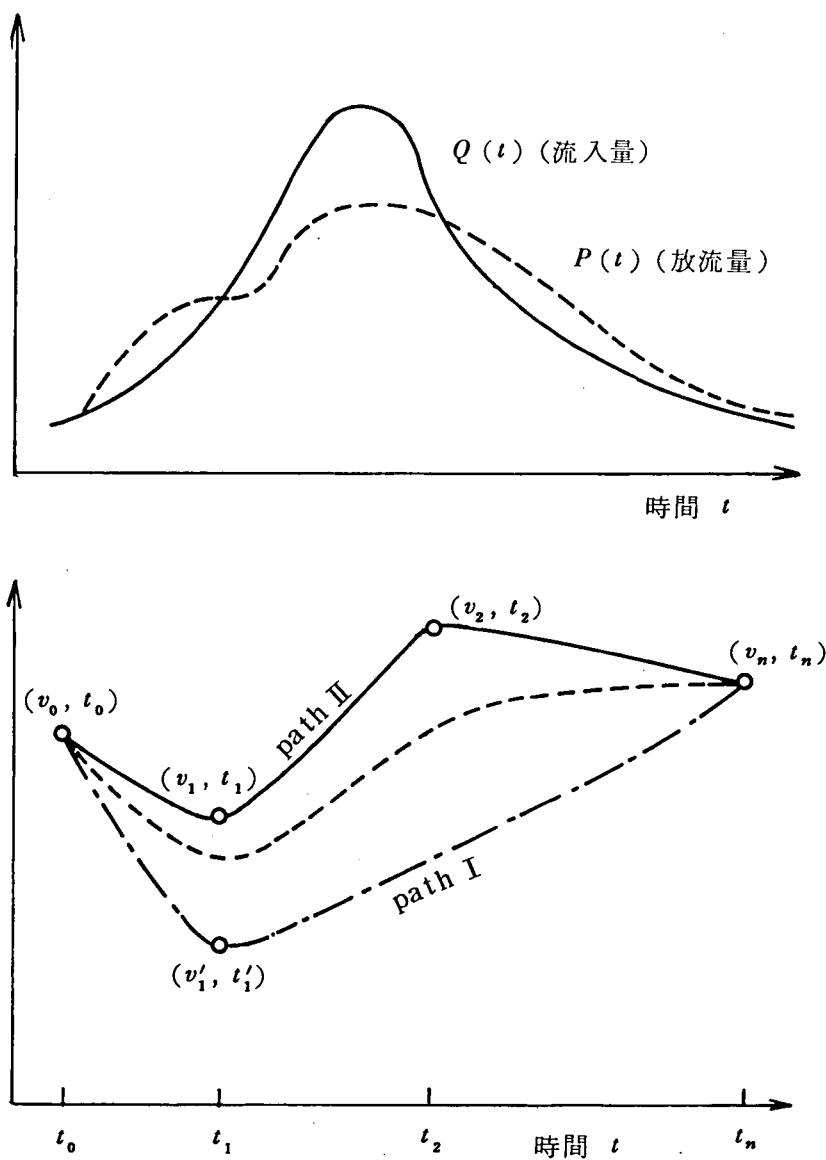
ダムゲートの制御については、各所で比較的簡易な装置によるゲート制御機構が実用されているが、ここで問題とするダムゲート制御は、単に現時点の流入量計測にもとづく一定比率による放流量制御あるいはその駆動機構ではなく、流入量予測にもとづく洪水全期間の貯水池運用をどのように考えるかという観点に立つものであって、出水の予想される時点から出水の終了までの全期間を通して、安全かつ有効な制御を実現させようとする制御方式あるいは意志決定方式を検討するものである。⁽³²⁾

5.3.1 単一ダムの洪水時運用曲線

ダムゲート放流量を決定する問題は、貯水池運用曲線を洪水*の発生から終了までの全期間にわたって決定する問題である。

すなわち、第 5.7 図に、洪水時の貯水池容量の変化（水位変化と考えてもよ

*) ここで洪水は、比較的多量の出水現象をさすものとする。河川管理上は一定量以上の流入量のある出水現象を洪水とよぶ。



第 5.7 図 洪水時の貯水池運用曲線

い) の一例を示しているが、流入量 $Q(t)$ に対してダム放流量 $P(t)$ を決定する問題は、洪水の予想されるに至った時刻 t_0 から、終了する時刻 t_n までの貯水池容量曲線 $v(t)$ を決定する問題と考えることができる。

この貯水池運用曲線の決定にあたっての評価基準ならびに制限条件は次のようになる。

まず、制御評価基準としては、出水終了後の電力の高効率運用ならびに取水のための貯水量確保のために、

(1) 出水終了後の貯水量 v_n を可能なかぎり高くすることがとられる。

これに対して、制限条件としては、

(1) 時刻 t_0 から t_n までの全ての期間で、貯水量 v_t が貯水容量の上限を越えないこと。

(2) 放流量 $P(t)$ がゲート放流能力の上限 P_{\max} を越えないこと。

(3) 放流量変化量 $\dot{P}(t)$ がその上限 \dot{P}_{\max} を越えないこと。

が与えられる。

(1) 項は文字通り貯水池溢水による洪水の防止であり、(2), (3) 項はゲート放流能力の限界を与えるものである。放流量変化量の制限はゲート操作の追従性と下流河川の急激な増加をさけるための制約からくるものである。

したがって、第 5.7 図の例にみるように、現在貯水量 v_0 から出発して最終目標貯水量 v_n (通常夏期制限最大貯水量) に至る多数の貯水池運用曲線のなかで、先にあげた制限条件にふれない曲線が一つの洪水時の運用曲線となる。

一般に最適曲線を求める方法はいくつか考えられるが、この場合には評価関数は終点に至るプロセスを問題とはせず最終値そのものに注目しているところから、終点に至る曲線を 2, 3 の彎曲線座標をパラメータとする曲線で近似し、制限条件を満たすパラメータを見つけ出すことによって解曲線を得るという方法をとるものとする。

5.3.2 最適運用曲線のパラメータ解空間と流入量予測

初期値 v_0 から最終値 v_n に至る曲線は流入量変化のばらつきや放流制限による多少の変化はあるとしても、大まかには、第 5.7 図の path I あるいは path II のような曲線で代表させることができる。これは洪水時における貯水池の役割が貯水効果を利用した自然流入量の調整にあることから、一度水位を低下させ、しかる後最終目標水位に向う運用が一般的な洪水時の貯水池運用パターンであることによっている。

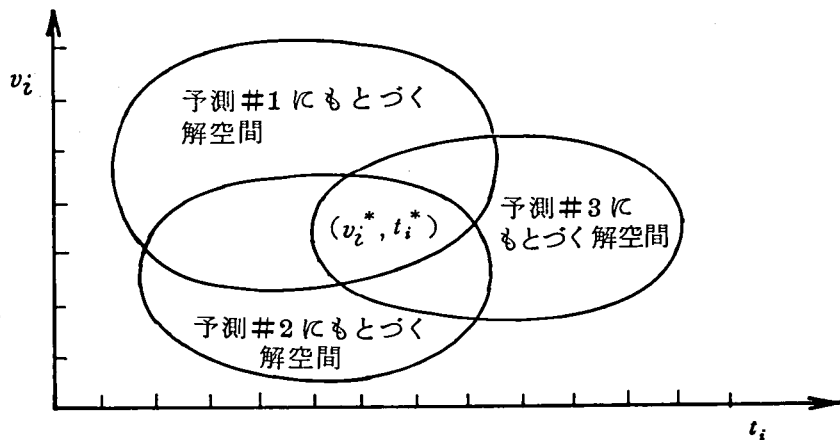
そこで、運用曲線として path I または path II を考え、出水の予想される

に至った時点 t_0 において, path I のパラメータ (v'_1, t'_1) , あるいは path II の (v_1, t_1) , (v_2, t_2) を決定することが, 貯水池運用曲線の決定のために必要となる。

さて, 時刻 t_0 において, 予測されるダム流入量 $Q(t)$ ($t_0 < t < t_n$) に対して, 先に述べた制限条件を満たす (運用曲線パラメータ v'_1, t'_1) あるいは (v_1, t_1) , (v_2, t_2) の組合せを求め, これを解空間と呼ぶことにする。これは, 想定される流入量 $Q(t)$ ($t_0 < t < t_n$) に対する安全かつ有効な放流パターン群を与えるものであるが, 離散的に選定した (v_i, t_i) のいくつかの組合せに対して計算機によるダム放流シミュレーションによって容易にもとめることができる。

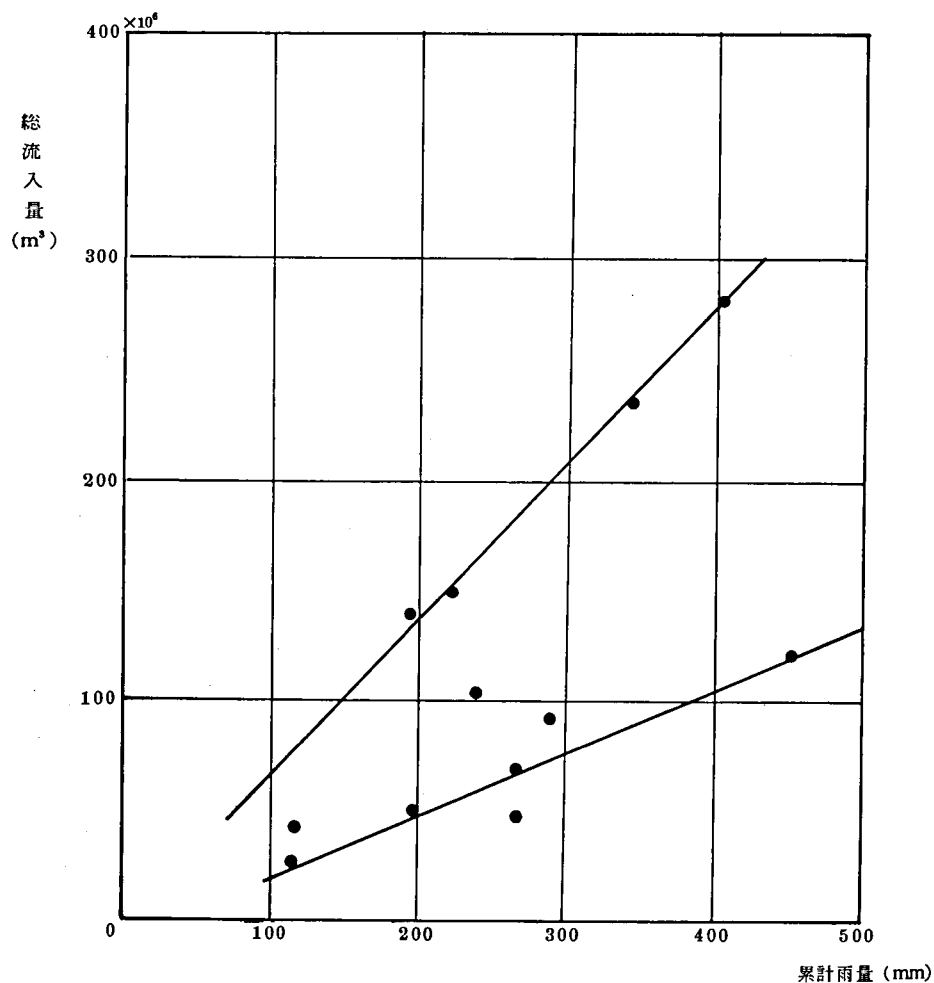
しかしながら流入量の予測は, 予測時間が長くなると気象予測の問題となつて非常にむづかしく, 時刻 t_0 において, 洪水が終了までの全流入量の変化 $Q(t)$ ($t_0 < t < t_n$) を正確に与えることはほとんど困難である。現在では総降雨量の予想によって過去の実績による総流入量予測, 最大流量予測がある程度の意味をもつにとどまる。

したがって, ある確率的な保証のもとに起り得るであろうと予測される何種類かの巾をもった流入量パターンのそれぞれに対し, 第 5.8 図のように解空間を求め, いずれの予測に対しても条件を満足する解の重なりがあればそれが与えられる情報のもとでは, 最も望ましい決定であると考ええる。

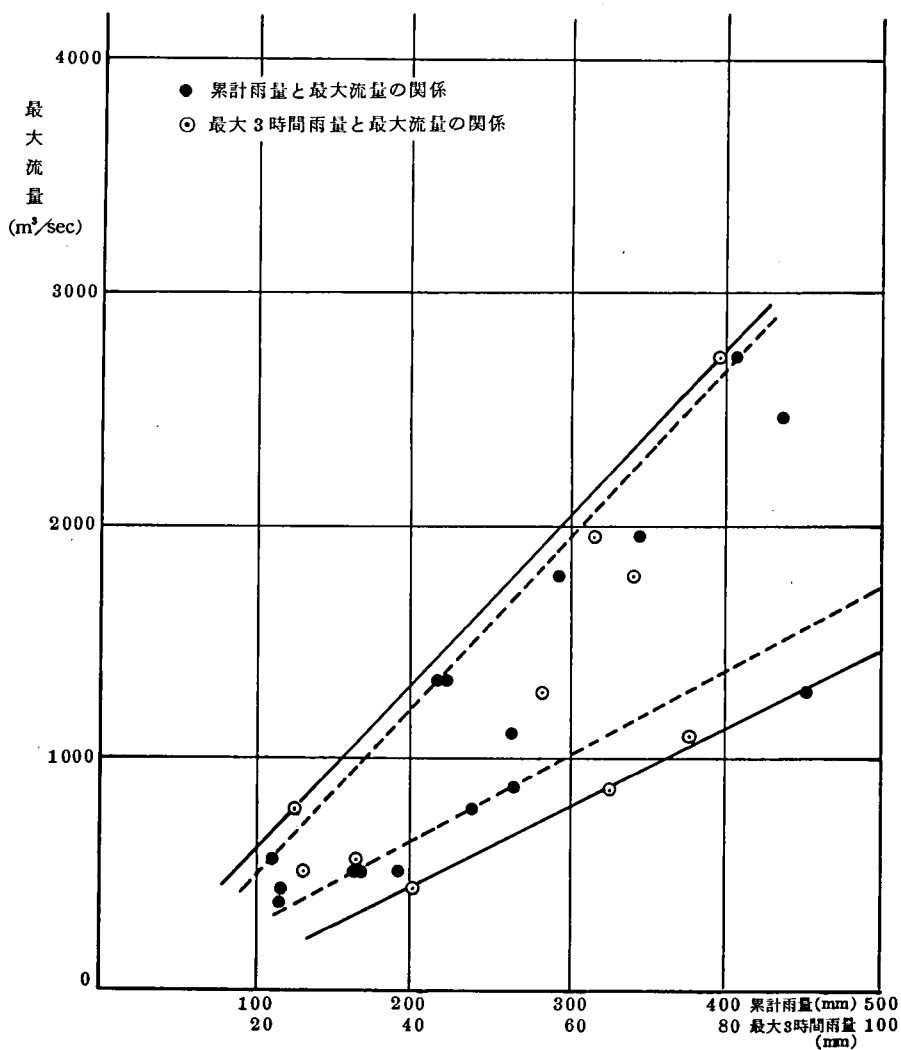


第 5.8 図 種々の予測にもとづく解空間

第 5.9 図は、過去の実績による累計雨量とダム流入総量の関係を調べたものである。また第 5.10 図は、ダム流入量の最大値（ピーク流量）が累計雨量あるいは最大 3 時間雨量とどのような関係にあるかを調べたものである。これらの図からわかるように、たとえば累計雨量がある時点で予測された場合に、流入総量あるいは、流入量最大値は、ある巾をもって予想される。したがって、それらから流入量のパターンを総流入量最大、最小、ピーク流量最大、最小の 4 組の組合せとして予想し、それぞれに対して貯水池運用曲線の解空間を求め、



第 5.9 図 累計雨量とダム流入総量の関係



第 5.10 図 累計雨量および最大 3 時間雨量と最大流量の関係

いずれの流入量に対しても重なりあうパラメータを運用曲線パラメータとして選定する。

いくつかの現実の洪水波形に対し、これらの解空間の重なりが存在することが確かめられているが、⁽⁵¹⁾もし、重なりのない場合には、より安全側に決定され

るべきであると考え、

このような考えに従って、相模、城山両ダムでは洪水の発生が予想されると、その時点での運用パターンを与えるパラメータ群を計算し、洪水時の貯水池運用の指針としている。さらに時間が経過するにつれて得られる新しい情報に対しても、時々刻々、同様のシミュレーションと運用曲線の決定を繰り返し、安全かつ有効な放流量制御を実現させている。

5.3.3 ダムゲート開度の制御

以上のようにして決定される運用曲線に沿って、放流量すなわちゲート開度を制御することは、目標曲線に対するマイナーコントロールの問題となる。

すなわち、時刻 t における貯水量を $v(t)$ とし、目標値を時刻 t_i において v_i に近づけるものとすれば、その間を直線化して、ゲート放流量 $P(t)$ は、

$$P(t) = Q(t) + (v(t) - v_i) / (t_i - t) \quad (5.6)$$

で与えられる。ここに $Q(t)$ は時刻 t におけるダム流入量である。

放流量 $P(t)$ が前記の運用制限条件にかかるときには、その限界値をとり、一方、目標値 v_i 、 t_i はその後の状況によって刻々修正されていく。放流量 $P(t)$ が定められると、それを実現させるゲート開度に変換され、ゲート開度偏差としてゲート駆動機構に伝達される。

このようにして時刻 t におけるゲート放流量あるいはゲート開度が決定されるが、現実には、次のような理由により、さらに安全を期すために、6時間先までのダム流入量予測により予測制御をおこなっている。

すなわち、

(1) 放流量変化量 $\dot{P}(t)$ の制限は、下流河川の急激な流量増加をさけるためにきびしく設定されており、(5.6)式で与えられる放流量 $P(t)$ が、これらの制限のために消化しえない事態をさけるために、予測によって制限条件の平滑化をおこなう。

(2) 数時間先の放流量予測をダム管理関係部門に伝達することが、安全対策上必要とされている。

(3) ゲート操作のおくれを補償する必要がある。

(4) 上流側ダムの放流量予測は、下流側ダムの流入量予測に必須である。

以上のように、洪水時のダムゲート制御は、

(1) 大まかな予測に従って目標曲線を決定、修正する目標値設定ループ

(2) 数時間先までの比較的精度の高い予測により、現時点およびその近傍の最適値を決定する予測制御ループ

(3) 最終決定された操作量を実現させる駆動機構
の三つの階層的ループによる制御を実現していることになる。(2)と(3)のループの間には、問題の性質から人間の介入を許し、また、(1)の決定の判断にも人間による意志決定の余地を残しているマン・マシンシステムにしている。

5.3.4 連水系、複数ダム系への拡張

以上のような三つの意志決定および制御のループから構成される洪水時の貯水池運用方式は、連水系、複数ダム系へも適用できる。

相模、城山両連水ダムにおいては、自然流入に近い流入をみる上流側相模ダムの操作をまず決定し、相模ダムの放流を中心とする流出量を下流側城山ダムへの流入として城山ダムの制御を考えている。

第5.11図は、過去の洪水データにもとづき、実時間シミュレーションをおこなったものである。図においては、両ダムのこれまでの検討による制御結果の水位変化、放流量変化をあらわしているが、貯水池運用曲線、水位の回復状況などほぼ満足できる制御結果を示している。

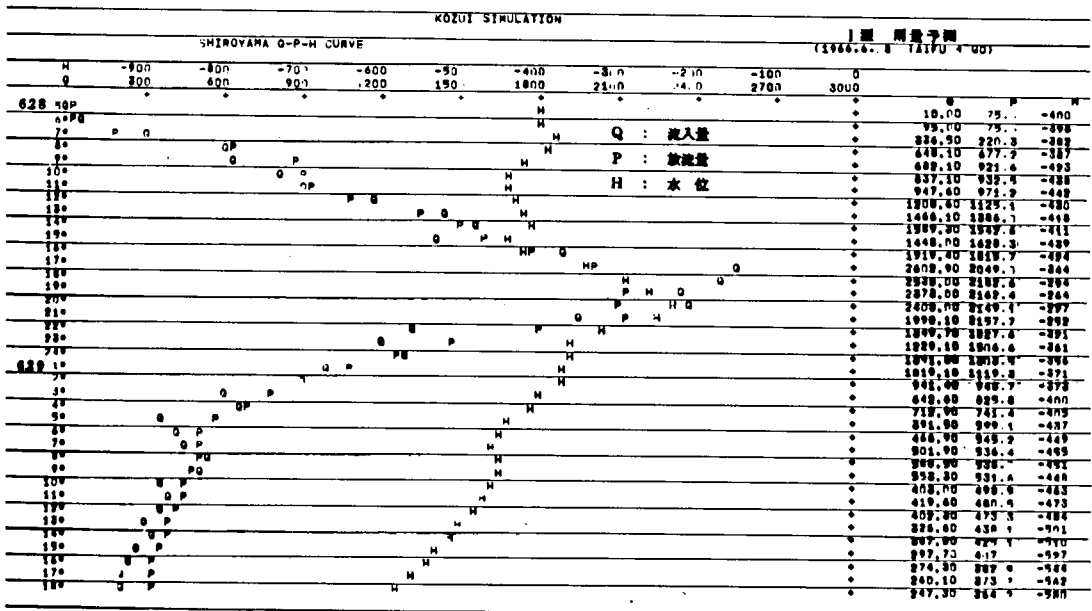
5.4 発電所運転計画の自動化と発電量制御

水力発電所の運転計画は、自流式発電所は別として、通常、貯水池の長期的な運用方針によって決められる日間使用水量をもとにして、電力需要の時間的変動、各種取水量要求などの外的諸条件、ならびに水系の構成によってきまる流下おくれや逆調整池の大きさなどの内的条件、さらに各施設の操作上の条件などを考慮の上決定される。

一般にスケジューリングの問題は、組合せの数は無数にあり、しかも各種の拘束条件が多数存在する上に、その評価は、総合的な判断にもとづいてなされることが多く、これを計算機でおこなわせる場合には、なかなかむづかしい問題となる。

各現場においては、それぞれ担当者が長年の経験と、人間の最も得意とする総合的判断力により、毎日の運転計画を作成している。

本プロジェクトでは、この業務を計算機に代行させるために、独自のプログラムを開発した。



- 81 -

プログラムの作成にあたっては、現在担当員により行なわれているスケジュール決定法をできるだけとり入れ、これをプログラム化した。考慮した各種制約条件は次のようなものである。

- (1) 逆調整池の水位変化をも含めて各発電機の水位による効率損失の考慮と発電機群の選択
- (2) 電力需要の時間的変動（負荷パターンによる優先順位の設定）
- (3) 発電機の始動，停止回数の制限
- (4) 揚水発電所の揚水状態による水位変化
- (5) 連水系の流下時間遅れ
- (6) 取水量の時間的変化

第 5.12 図は，計算機で作成した相模，津久井両発電所の運転スケジュールの一例である。

このようにして作成された運転計画は，長期運用計画とその期の自然流入量とにもとづく翌日のための日間運用予定となる。通常は，これにもとづいて発電量が時間単位に制御されるが，渇水期には，第 3 章で詳しく検討したように，これを基準としてさらにきめ細かく制御し，無効放流を最小にすることが考慮されている。

5.5 水系データの管理

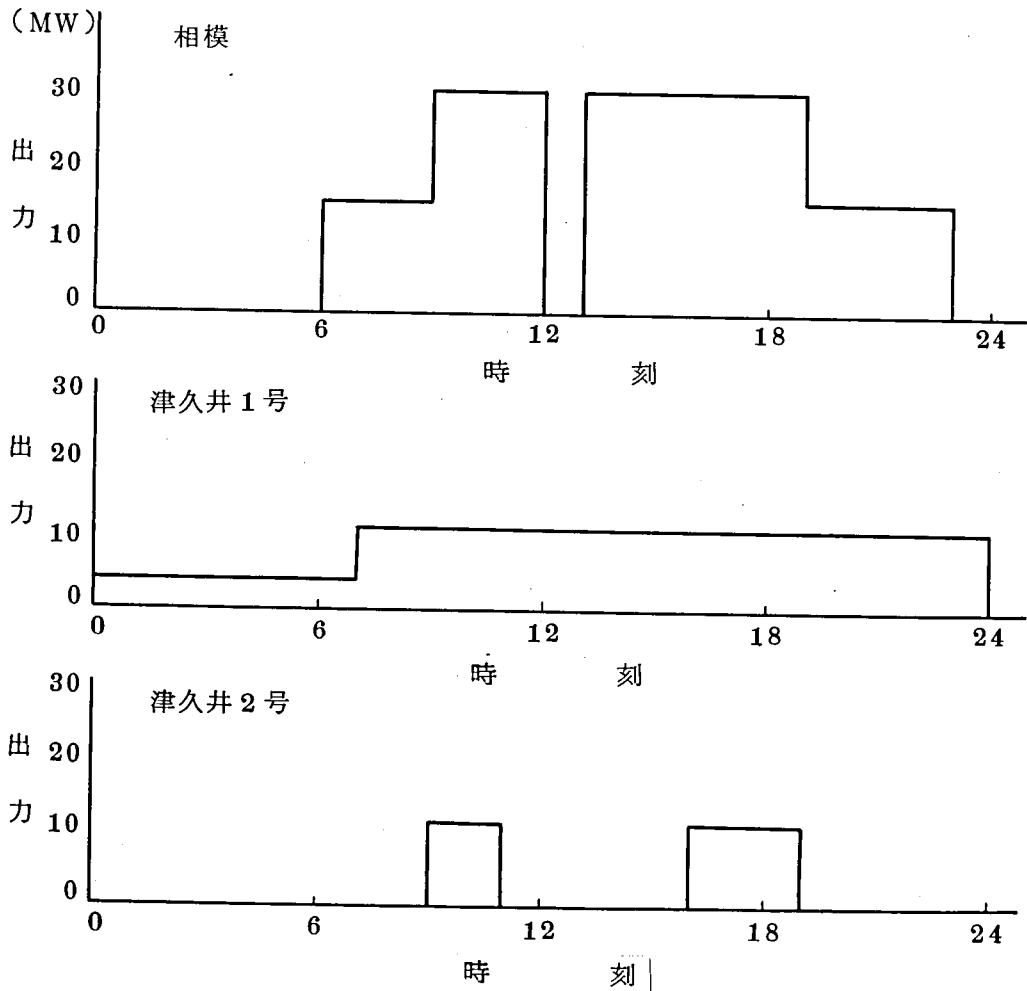
水系制御，管理において，水系の状況把握が基本になることは云うまでもない。

このため，14 局にのぼる雨量観測局，15 局の水位観測局をはじめとして，発電電力量やゲート開度などのデータが中央の電子計算機システムによって収集され，累積や変換がほどこされて利用されている。

相模川水系集中管理システムでは，これらの時表示，ロギングタイプアウトの他，これらの資料の自動的な編集，整理，分析をおこなっている。

各種報告書（日報，月報，年報）の自動作成はもとより，磁気テープならびにカードによるデータの管理をおこない，各種水文計算の基礎資料としている。

なお，水系集中管理システムの構成については，付録にその概要を記述する。



城山ダム平均使用水量： 0 m^3/sec
 相模ダム平均使用水量： 45.10 m^3/sec
 電力需要型： 点灯型
 津久井分水量： 15.60 m^3/sec
 下流放流量： 13.00 m^3/sec

第 5.12 図 計算機で作成した相模，津久井両発電所の
運転スケジュールの一例

5.6 結 言

本章では、相模川水系集中管理システムの運用にあたって検討したいいくつかの問題について、検討結果を述べた。本章で得た主な結論は次のとおりである。

(1) 従来、貯水池運用は主として電力利用の立場から論じられてきたが、多目的ダムの貯水池運用という見方で問題を整理し、出水期制限水位ならびに確保貯水量の上下限のもとで、相模、城山両連水ダムの多段決定問題を年間総発電量最大という目的関数のもとで解き、長期運用の指針とした。

また、確保貯水量の算出にあたっては、年間を36期に分割した各期の流入量分布曲線を過去20年近いデータから求め、漏水確率を算出することによって、各期の確保貯水量をもとめた。

(2) 洪水時のゲート制御問題を不確実情報にもとづく意志決定の問題と階層的制御の問題として取り扱い、大まかな予測にもとづく運用曲線の決定と修正、短期間予測データにもとづく放流量決定ならびにゲート開度制御機構の三つのループについて、相模、城山両ダムで実施している考え方を記述した。このようなゲート制御方式は我が国で最初の試みである。

(3) その他、水力発電計画の自動化と平常時の水力発電制御の問題、ならびにデータ収集にもとづく水系データの管理について、相模システムにおける実施例を紹介した。

第6章 結 論

本研究において得られた主要な成果はつぎのとおりである。

- 1) これまでの河川流出予測機構は固定形のもので大まかな予測にはよいが、実時間制御のためのきめの細かい予測には適さないので、可変パラメータを導入した適応形流出予測モデルを開発した。大小種々の出水現象に対して、比較的精度よく、短期間の予測が実現され、実用に供されている。(第2章)
- 2) 河川流下のダイナミックスを与える古典的な水理学の基本式は、初期状態を設定して繰返し形の演算によって解かれるが、実時間制御のモデルとしては不適当であり、河川が比較的ゆるやかな応答をするプロセスであることに着目して、可変形パラメータをもつ一次遅れ特性で近似し、実用に供することができることを確かめた。

これを用いて、増大する水需要に対して無効放流を極力少なくすることを目的とした水力発電量制御の問題を、雑音を含むプロセスの推定、同定、最適化の問題として記述し、制御方式を確立した。制御評価を誤差吸収能力をもつ取水調整池の容量で表わし、本方式の効果を確かめた。さらに現実の適用にあたって、降雨のある場合ならびにプロセスが定常である場合について拡張し、それぞれ実験による確認をおこなった。(第3章)

- 3) 一般的に、雑音を含む確率的な系の推定、同定、制御において、逐次形推定法が有効に適用できることをいくつかの実際に直面する実例について示し、この推定法の適用にあたって重要な鍵となる雑音特性の把握の方法について検討した。新しく開発した系雑音ならびに観測雑音の分散値を推定する雑音特性分離機構は計算機によるシミュレーションの範囲で非常に良好な結果を示し、この分離機構の併用によって適応形逐次推定が可能であることを確かめた。状態量の推定において、平滑定数を適当に選んだ指数平滑法、重みづけ係数を適当に選んだ最小自乗法、あるいは、雑音分散値を仮定したカルマン形推定法などに比較して、本方式はすぐれた特性を示している。(第4章)
- 4) 相模川水系の運用にあたり、基本となる貯水池長期運用方式を多目的ダムの総合運用という観点から整理し、統計的な渇水確率から算出した水需要のために確保すべき各期の貯水量を運用の下限とし、洪水調節のための期別制

限水位を上限として、連水系をなす相模、城山両ダム の運用曲線を、年間総発電量最大という目的関数のもとで解き、年間運用の指針とした。

また、洪水時のゲート制御問題を、不確定な情報にもとづく意志決定の問題と、階層的制御の問題として取り扱い、大まかな予測にもとづく運用曲線の決定、短期予測にもとづく放流量決定およびゲート開度制御機構の三つのループからなる制御系を構成した。過去の洪水データに対するシミュレーション実験はもとより、現在まで、いくつかの実際の出水に対して、本方式が採用されている。

この他、水力発電所の運用計画作成、各種報告書の作成ならびにデータの管理などに、計算機が利用されている。(第5章)

- 5) 相模川水系集中管理システムは、中規模な汎用電子計算機を中心として構成され、オンライン・データプロセッシングと計算機の時分割利用を可能にしている。システムの設計にあたっては、ハードウェアおよびソフトウェアに種々の新しい試みが加えられている。(付録)

なお、本研究には含まれていないが、あるいは部分的な検討に終わっているが、今後の研究課題として残される関連項目として次のようなものがある。

- (1) 一般に、現象のモデル化の問題を考える場合に、操業データの蓄積によって学習的によりよいモデルが形成されていくような過程の研究
- (2) 確率的な系の制御において、推定、同定、最適化というような正統的な手順をふむことなく、離散的な制御可能量の選択と制御評価の関係から意志決定の問題として制御限界に近づくことはできないかどうか。
- (3) 雑音特性分離の問題の有色雑音系、非線形系への拡張
- (4) 全国的に重要視されている複合ダム系の洪水制御問題の統一的な解決

謝 辞

本研究は、神奈川県企業庁と筆者の所属する三菱電機株式会社との共同研究を通して行なわれたものであって、終始熱心なご討議、ご指導を賜った県企業庁開発局ならびに電気局の関係各位に心から謝意を表すものであります。また、この研究に対して種々の有益なご教示とご討論を賜った成蹊大学工学部福田節雄工学部長ならびに豊田淳一助教授に心から御礼申し上げます。

また、京都大学学部、大学院在学中はもとより、卒業後も変らぬご指導とご鞭撻を賜っている京都大学工学部林千博教授、さらに本研究の完遂に対してご懇篤なご指導を賜った京都大学工学部桑原道義教授、また学会などを通じてご鞭撻を賜っている京都大学工学部近藤文治教授に深甚の謝意を表します。

さらに本研究の遂行にあたり、ご指導とご協力をいただいた神奈川県城山事務所鳥海則昌係長はじめ電気通信課の各位、深いご理解とご鞭撻をいただいた三菱電機鎌倉製作所嶋村和也課長ならびに鈴木昌三課長、またご協力とご討議をいただいた同僚の吉田修己、望月純夫両氏はじめ多くの関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- (1) 系統運用委員会：電力系統の経済運用に関する研究，電力中研（1962）
- (2) 土木学会：土木工学ハンドブック
- (3) V.T.Chow：Open Channel Hydraulics（1959）McGraw Hill
- (4) 本間・安芸編：物部水理学（昭 37）岩波書店
- (5) 土木学会：水理公式集（昭 38）
- (6) 木村：貯留関数法 土木技術資料 3-12 UDC 627. 135.5（建設省）
- (7) 菅原：科学技術庁資料局報告書（水 107 水門 69 37.10.31）
- (8) R.G.Brown：Smoothing, Forecasting and prediction of Discrete Time Series,（1963）Prentice-Hall
- (9) R.E.Kalman：A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems, J.Basic Eng. 82 D, ASME（1960）
- (10) R.E.Kalman, R.S.Bucy：New Results in Linear Filtering and Prediction Theory, J.Basic Eng. March 1961, ASME.
- (11) H.W.Sorenson：Kalman Filtering Techniques, C 478. Advances Control Syst. 3,（1966）
- (12) 豊田・井上他：アダプティブモデルによる河川流出予測 他. 昭 41 年電気学会東京支部大会 40～42.
- (13) 豊田・井上他：水系オンライン制御のためのアダプティブ流出予測機構, VOL.88-5, NO.956（電学誌）
- (14) R.A.Howard：Dynamic Programming and Markov Process（1960）Jhon Wiley & Sons
- (15) R.Bellman：Adaptive Control Process；A Guided Tour, Princeton Univ. Press.（1961）
- (16) J.E.Gibson：Nonlinear Automatic Control；McGraw-Hill.（1963）
- (17) W.J.Murphy：Optimal Stochastic Control of Discrete Linear Systems with Unknown Gain, IEEE TRANS. ON AUTOMATIC CONTROL, VOL AC-13 NO. 4, August 1968.
- (18) M.Aoki：Optimization of Stochastic System, Academic Press.（1967）

- (19) T.Nishimura : Error Bounds of Continuous Kalman Filters and the Application to Orbit Determination Problems.
IEEE Trans. VOL. AC-12, June 1967.
- (20) 榎木・吉川 : 確率的制御過程および適応制御過程における制御性能の上, 下限界について ; 制御工学 第 12 巻, 8 号, 12 号
- (21) 藤田 : 有色雑音に対する最適線形推定過程の感度解析 ; 第 8 回 SICE 予稿 239
- (22) 榎木・芳村 : 非線形系の未知パラメータ推定に関する一研究 ; 計測自動制御学会論文集, 第 3 巻 第 3 号
- (23) 榎木・吉川 : 不確実なパラメータを含む系の準最適制御 ; 制御工学 第 11 巻 第 12 号
- (24) T.Fukao : System identification by Bayesian learning processes, I and II. Bell. Electrotech. Lab. 29, NO.5 (1960)
- (25) 井上・望月 : 非線形システムの動特性パラメータ決定のための一手法 ; 昭 41 年 電気四学会連大 1789.
- (26) 井上 : 雑音を含むプロセスの計算機制御における制御限界と制御方式について ; 昭 43 年 電気学会東京支部大会 416
- (27) B.T.Fang : Kalman-Bucy Filters for Optimum Radio-Inertial Navigation ; IEEE. Trans. AC-12. August. 1967
- (28) F.H.Schlee : Divergence in the Kalman Filter. AIAA Journal. June 1967
- (29) L.D.Brock, G.T.Schmidh : Statistical Estimation in Inertial Navigation Systems. IEEE. Trans. VOL AC-13 December 1968.
- (30) T.Nishimura : On the Apriori Information in Sequential Estimation Problems. IEEE. Trans. VOL AC-11 April. 1966
- (31) 井上・望月 : 取水量確保のための水力発電量制御 VOL. 90 NO.5, 1970 (電学誌)
- (32) J.Toyoda, Y.Inoue, O.Yoshida, N.Toriumi : Optimal

- Forecasting for Computer Control of Water Resource Systems; 1968 IFAC Symposium on Optimal Systems planning; at CASE WESTERN RESERVE UNIV. OHIO, USA
- (33) 豊田・小岩井・井上：系統制御のための河川ダイナミックスの解析について；昭 43 電四連大 井 888
 - (34) 井上・望月：河川システムのモデル化と計算機制御；計測自動制御学会システム工学部会（1968）
 - (35) J.Toyoda, N.Toriumi and Y.Inoue：An Adaptive Predictor of River Flow for On Line Control of Water Resource Systems：Automatica, VOL.5. 1969
 - (36) 豊田・井上：電力系統オンライン制御のためのカルマンフィルターの応用について；昭 43 電四連大, 井 886
 - (37) 鳥海・井上他：神奈川県企業庁向け相模川水系計算制御システム；三菱電機技報 第 41 巻 第 5 号（1967）
 - (38) 鳥海・井上他：MELCOM-1600 による相模川水系計算制御システム的方式設計；三菱電機技報 第 41 巻 第 5 号（1967）
 - (39) Government of Malaysia：Muda Irrigation Project, contract NO.5 CONTROL SCHEME（1967）
 - (40) 関口：単一ダム系の最適取水量への一提案，計測と制御 VOL.4 NO.6
 - (41) 井上・大野：確率的な系の推定，同定問題における雑音特性の分離について；第 8 回 SICE 予稿 235
 - (42) 井上・豊田：電力系統オンライン制御への逐次形推定法の応用と系雑音および観測雑音の分離機構について；VOL. 90, NOV. 6, 1970（電学誌）
 - (43) 穂坂：電子計算機の障害対策の現状と将来；電気通信学会シンポジウム（昭 42 年）
 - (44) M.M. Dickinson：Saturn V Launch Vehicle Digital Computer and Data Adapter；Proceeding, FJCC, 1964
 - (45) 三好・井上：宇宙開発に関する情報処理技術の現状と将来；雑誌 OHM（昭 44 年 3 月号）
 - (46) 井上：月ロケットの誘導制御と誘導計算機；OHM BULLETIN, 5. 1969

- (47) T.C.Wood : A Generalized Supervisor for a Time-Shared Operating System; FJCC, 1967
- (48) J.I. Schwartz, E.G. Coffman : General-Purpose Time-Sharing System, SJCC, 1964
- (49) F.J. Corbato, V.A. Vyssotsky : Introduction and Overview of the Multics System, FJCC, 1965
- (50) IBM System Reference Library; IBM System/360 Principles of Operation; Form A22-6821-0.
- (51) 相模川水系計算制御共同研究委員会 : 相模川水系計算制御共同研究報告書 (昭 44 年 3 月)

92 項欠

相模川水系集中管理システム

1. まえがき

相模川水系の集中管理を目的として、電子計算機を中心として水系管理システムが神奈川県企業庁総合開発局城山事務所に設置され、昭和42年4月から運用されている。

本文では相模川水系集中管理システムについてその概要を記述する。

2. システム設置の目的

相模川は、その源を山梨県の富士五湖に発し、神奈川県中央部を南下して相模湾に注ぐ流況の比較的よい県最大の河川であり、はやくからこの水資源が着目され、相模ダム・沼本ダム・道志ダムが建設され、さらに昭和39年度末、有効貯水量約5,000万 m^3 の城山ダムが建設されて、水道用水・工業用水・農業用水等の確保、電力の供給ならびに洪水時の下流災害の軽減がはかられてきた。

しかし人口の都市集中化と経済の発展にともなう工場施設の増加は急激な水需要をうながし、相模川水系の水資源のよりいっそうきめ細かい利用が必要とされるにいたった。

このため、水系の状況はあく、水系諸特性の解明、さらには水系全体を一貫した考え方で運用する指令の伝送を実現する水系集中管理システムの設置が計画された。

このシステムの設置は、前述のように、水資源を有効に利用することを主眼として計画されたものであるが、それと同時に、防災、貯水池運用の総合計画、さらには新しい水資源開発のための設計等、多方面に及ぶ利用が考えられている。

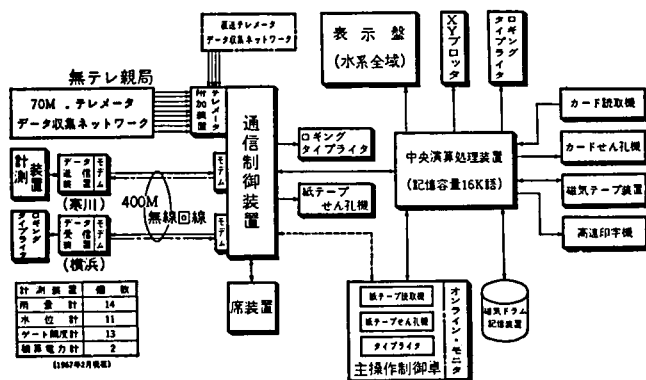
昨今、利水・治水・発電等を目的としたいわゆる多目的ダムが各地に建設され、その集中管理、運用の自動化が各方面で検討されているが、本相模川水系計算制御システムはわが国最初の総合管理システムとしてその運用が着目されている。

3. システムの構成

図付 1 に 相模川水系集中管理システムの構成ブロック図を示す。この図からも明らかなように、このシステムは

- (1) 計測装置
- (2) 伝送装置
- (3) 通信制御装置
- (4) 端末表示装置
- (5) 中央演算処理装置およびその入出装置

からなっている。



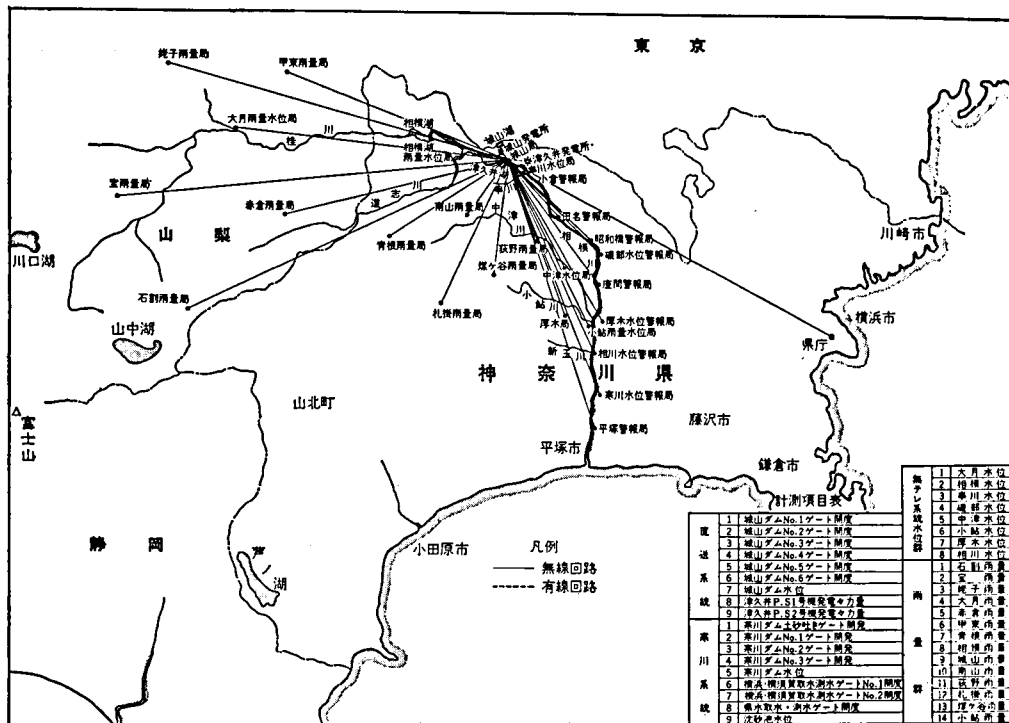
図付 1 相模川水系集中管理システム構成ブロック図

表付 1 計測地点および計測項目数

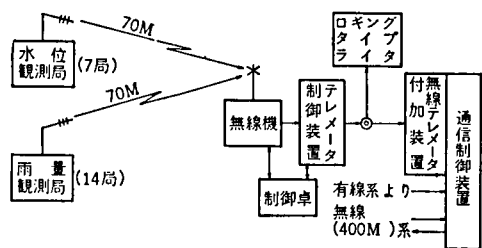
計測地点 \ 計測項目	水位	ゲート開度	積算電力量	雨量	計備考
道志調整池	(1)	(4)	(2)		(7)
相模貯水池	1	(6)	(2)		1(8)
沼本調整池	(2)				(2)
城山貯水池	1(1)	6	2		9(1) 本沢ダムを含む
寒川ダム	2	7			9 沈砂池を含む
雨量観測局				14	14
水位観測局	7(1)				7(1) 河川氷位
計	11(5)	13(10)	2(4)	14	40(19)

注 1) () 内の数値は増設予定

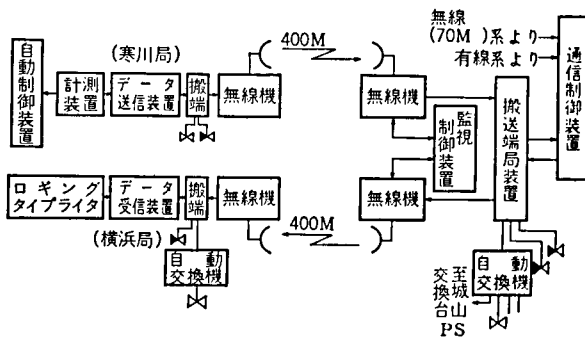
注 2) 雨量観測局, 水位観測局の位置については図付 2 参照



図付2 データ伝送網構成図



図付3 70MHz帯無線データ伝送系統構成ブロック図



図付4 400MHz帯無線データ伝送系統構成ブロック図

3.1 計測装置

このシステム設計上の要求から考えて雨量・水位・ゲート開度および発電量などの原始データを収集する計測装置の占める役割は非常に重要である。これ等計測装置の展開位置およびその数については立地条件・経済性・計測効果・システム運用等々のあらゆる問題を考慮する必要がある。昭和42年2月現在

の設置数および増設予定数は表付 1 に示すとおりである。

これ等の計測装置はいずれも A-D 変換器 (A/D CONVERTER) をふくみ、1 量あたり 10 進 3 ケタ (桁) (または 4 ケタ) のデジタル量で中央演算処理装置に送られる。

3. 2 伝送装置

図付 2 は相模川水系計測制御システムのデータ 伝送網構成図である。このように広範囲におよぶ水系全流域に点在する計測装置からのデータは 70 MHz 無線テレメータデータ 伝送装置、400 MHz 帯多重通信装置、および有線データ 伝送装置を介して中央に伝送される。

図付 3, 3. 4 に 70 MHz 系、400 MHz 系のそれぞれについて系統構成ブロック図を示した。

3. 3 通信制御装置

無線、有線両系統のデータ伝送システムを統合し、かつ収集、分配データを中央電子計算機と直結させるため通信制御装置が設置されている。

3. 3. 1 通信制御装置の動作目的

(1) データ収集と分配

流域各地に散在する各種のデータを集め、中央演算処理装置にオンラインで結合させるための制御を行なう。また同時に処理されたデータの分配も可能である。

(2) 回線の接読、切断、および監視等

中央演算処理装置との連携によるデータ授受および中央演算処理装置と独立したデータ収集等において回線の接続・切断・監視に関する制御を行なう。

(3) 速度変換

データ収集、分配における伝送速度と中央演算処理装置における処理速度との間のマッチングを行なう。

(4) 信号構成の変換

データ収集、分配の制御過程において生ずる信号形式と中央演算処理装置との間のそれとの相互変換を行なう。

(5) 誤り制御

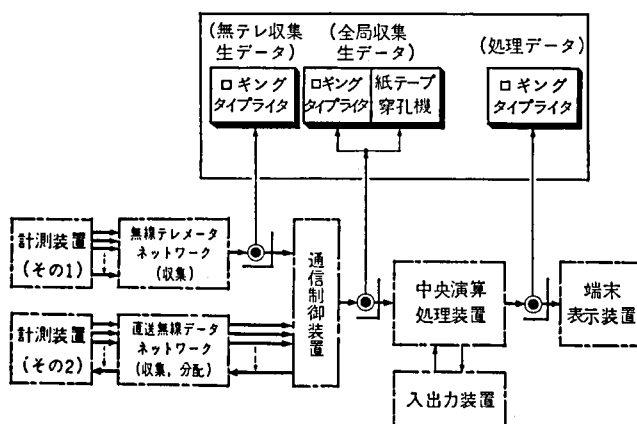
伝送によって生ずる雑音、瞬断等の外乱に対して常に安定した正確なデータ伝送を行なうための誤り制御機能を有している。

3.3.2 通信制御装置の機能概要

通信制御装置は時計を内蔵し、設定されたサンプリング時間間隔ごとに収集指令をだし、収集データに対する各種チェックおよび再送制御機能を有する。一方計算機からの指令およびデータを端末に伝送する制御を行なう機能を有しており、6個所の端末にデータ分配を行なうことができる。

このように通信制御装置は計算機とオンラインで結合し、収集時間がくるとに「割込み (INTERRUPTION)」を発生し、収集にともなうデータ処理ルーチンに自動的に突入するが、計算機とは独立にデータを収集し、収集したデータをロギングタイプアウトし、かつ紙テープにセン(穿)孔してゆく機能をも有している。

図付5はデータ収集から処理されてアウトプットされるまでの過程におけるデータ・モニタの要領図を示す。



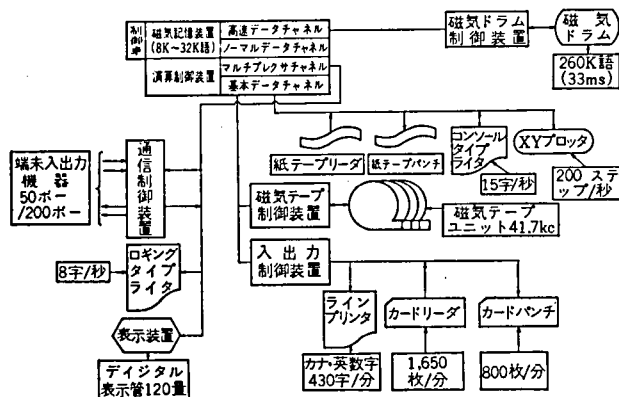
図付5 システム責任分界点と収集、処理、分配データの記録要領説明図

3.4 端末表示装置

図付1よりも明らかとなおり、本システムの端末表示装置としてX-Yプロッタ装置および水系全域表示盤が設けられている。このなかで水系全域表示盤は相模川水系全域の計測装置の瞬時値がデータ収集後計算機でしかるべき処理計算機をほどこし、直ちに表示されるようになっている。表示項目として時間雨量・累計雨量・水位・流量・発電機放流量・ゲート放流量などがあるが、これによって水系の現在状態を生きた姿として瞬時にはあくすることができる。

3.5 中央電子計算機システム

相模川水系計算制御システムの中軸をなす中央電子計算機には、MELCOM-1600 オンラインリアルタイムデータプロセッシングシステムが導入された。このシステムは、図付 6 に示すようなユニットから構成されている。



図付 6 相模川水系集中管理システムのための MELCOM-1600 オンラインデータ・プロセッシング・システム構成図

表付 2 中央演算処理装置の主要性能

項 目	性 能
演 算 方 式	並列演算方式
記 憶 容 量 (語)	16,000
語 長 (ビット)	18
クロック 周波数 (Kc)	333
メモリ・サイクル (μ s)	6
間 接 番 地 指 定	可能
固定加減算速度 (μ s)	12(直接アドレス), 18(間接アドレス)
固定乗算速度 (μ s)	54
浮動加減算速度 (μ s)	600
浮動乗算速度 (μ s)	900
記 憶 保 護 機 構	有

3.5.1 中央演算処理装置

オンライン・リアルタイム機構、すなわち多レベルの割込み処理機構、メモリプロテクト機能および各種エラー検出機構をそなえ、制御用電子計算機の機能を有すると同時に、技術計算・事務データ処理も可能である完全なはん用性

表付3 磁気ドラムの主要性能

項 目	性 能
回 転 数 (rpm)	約 1,000
記 憶 容 量 (語)	260,000
データ・トラック(本)	256
	クロック トラック 1 本
	セクター トラック 1 本
	オリジン トラック 1 本
ヘ ッ ド	259
平 均 ア ク セ ス	約 30msec
記 憶 方 式	位相変調式

表付4 磁気テープ装置の方式および性能

項 目	性 能
テ ー プ 速 度	75"/sec (190cm/sec)
記 録 速 度	200/556 BPI (Bit/INCH)
伝 送 速 度	417kc (キャラクタ/sec)
記 録 方 式	IBM NRZ 7 トラック
テ ー プ 幅	1/2 インチ幅 IBM磁気テープに同じ

を有している。

また入出力機器の同時動作を可能にするいくつかのデータチャンネルを有し、プロセッサの処理能力を高めている。

中央演算処理装置の主要性能は表付2のとおりである。

3.5.2 磁気ドラム記憶装置

人手を介さずに、外部からの割込み信号によって、種々のプログラムが、連続処理、あるいは時分割処理されるために、基本的なプログラムは磁気ドラムに入れられている。また、河川流出予測等に必要過去の連続データが記憶される。

磁気ドラムの主要性能は、表付3のとおりである。

3.5.3 磁気テープ記憶装置

多量データの記録用として、あるいは、データ処理の補助記憶装置として、4台の磁気テープを設置した。主要性能を表付4に示す。

3.5.4 入出力装置

入出力装置として、次のような機器が設置されている。

- (1) カード読取機 (1650 枚/分)
- (2) カードせん孔機 (400 枚/分)
- (3) 紙テープ読取機 (400 字/秒)
- (4) 紙テープせん孔機 (25 字/秒)
- (5) XYプロッタ (200 ステップ/秒)
- (6) ロギングタイプライタ (8 字/秒)
- (7) ラインプリンタ (430 行/分, カナ英数字)
- (8) コンソールタイプライタ (15 字/秒)

3.6 ソフトウェアシステム

計算機ハードウェアの機能を十分に活用し、しかも全システムに要求される種々の機能を実現させるために、ソフトウェアシステムの設計には、十分な検討がはらわれている。

相模川水系集中管理システムに要求される計算機システムは、一般の計算機と同様に、外部から多くの利用者に利用されるというオフライン・バッチ処理機能と、一定時間間隔ごとのデータ収集にはじまる一連の制御計算等のオンライン処理とが、自動的に、しかも効率よく時分割処理されることが必要である。

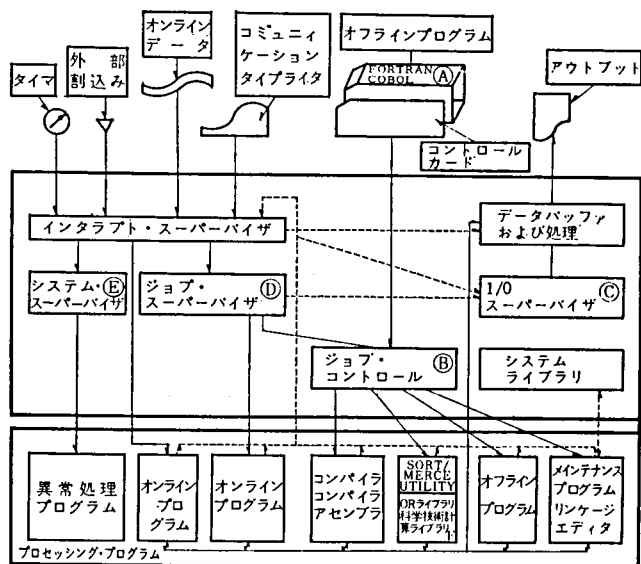
このために用いられる MELCOM 1600 システムは、常に SUPERVISOR プログラムが記憶装置に常駐し、外部からの各種割込信号を処理して円滑な自動連続処理を可能にするよう設計されている。

このほか、データ送受信などの計算機の内部処理に比べて処理速度のおそい入出力機器の制御のために、計算機が占有されないよう入出力制御は、独立して処理されるようになっている。

相模川水系集中管理システムに用いられた MELCOM 1600 オンラインデータプロセッシングシステムのソフトウェアは、このような要求に対処するため、SUPERVISOR PROGRAM の管理のもとに統一してソフトウェア体形がとられ、1600 オペレーティングシステムとしてまとめられている。

図付 7 はその構成図であり、その機能は次のように要約することができる。

- (1) 問題を解くためのプログラム言語として、FORTRAN, COBOL, SIA (アセンブラ) 等が利用できる。(図中 A 参照)



図付 7 MELCOM-1600 オペレーティングシステム構成図

(2) 種々の言語で書かれたプログラムのコンパイル，アセンブル，および実行を連続して処理することができる。(図中 B 参照)

(3) 入出力動作は，内部処理とは独立におこなわれ，同時にいくつもの入出力機器を制御すると同時に，内部演算との並列処理が可能である。(図中 C 参照)

(4) タイマ，外部スイッチ，その他外部からの割込信号によって，優先度の高いプログラムと入れかわることができる。もちろん，中断されたプログラムは，自動的に優先度の高いプログラムの終了後，継続して実行される。(図中 D 参照)

(5) プログラムの実行中に異常事態が発生した場合には，すべて監視プログラムに知らされ，できるだけオンラインプログラムの実行のさまたげにならぬような処置がほどこされるとともに，バックアップシステムへの連絡がとられる。(図中 E 参照)

4. システムの運用

相模川水系集中管理システムがどのように運用されているかについて，以下にその概要を述べる。

(1) データ収集とロギングアウト

通信制御装置内蔵のタイマにより、一定時間ごと（平常時は正時ごと、洪水時は15分ごとを基本とする）に計算機にデータ収集割込信号が送られ、計算機はその受入れを確認すると同時に、データ収集指令を通信制御装置にアウトプットする。

通信制御装置は各計測装置の現在値を収集し、計算機に送る。計算機は、これらのデータを、水位－流量変換・時間雨量・累計雨量計算、あるいはゲート開度－放流量変換等を施して、ロギングタイプライタおよび表示装置にアウトプットする。また、重要項目をデータ伝送網を通じて本庁（横浜）に伝送し、洪水時の状況判断の便をはかっている。

なお収集データは、編集されて磁気テープに収められ将来の解析・計画等の資料として保存される。

(2) 河川流出予測

データ収集完了後、観測データと、現在までの連続した過去のデータをもとに、各河川の流出量予測がおこなわれる。予測に用いられる河川流出モデルは、常に新しいデータにもとづいて自己修正され、状況に適したモデルによって常に予測が連続するよう工夫されている。

(3) 流出予測にもとづく放流量制御

出水時には、流出予測にもとづいてダムゲート放流量が計算され、それがゲート開度設定値となって、相模・城山両ダムの操作指令としてアウトプットされる。

また、平常時は、城山ダムから発電機を通じて下流に放流される放流量が、水需要以上になってむだに海へ流れてしまうことを避けるために、下流の状況をはあくし、必要十分な放流となるよう制御指令が打ち出される。これらの貯水池運用指令アウトプットにもとづき、ダムゲート・発電機が操作されるが、たとえば、洪水時のゲート開度計算は、従来、人手によってなされていたときには2時間以上もかかった仕事が数秒で完了し、それだけ速い、安全な処置が可能になってくる。

以上の三項目は、実時間で処理される一連の仕事であり、原則として四六時じゅう、連続運転され、これによって平常時における発電放流量制御、出水時の放流制御が実行される。

このようなオンライン制御のためのデータ処理、計算とはまったく独立に中央電子計算機は、技術計算・事務データ処理を問わずあたかも計算センタの計算機のように自由に利用できるように設計されている。現在、相模川水系の貯水池運用を中心に、次のような問題が、このシステムによって解析されている。

(a) 相模・城山両ダムの年間運用の運用曲線を求める。

これは、相模川水系計算制御の基本的な問題であり、渇水を保証し、洪水を防ぎ、かつ、年間の発電総量を最大にするような貯水池運用曲線を電子計算機により算出する。

(b) 取水可能量の算出

水系流入量は、統計的にしかはあくできない性質のものであるが、一体、この水系から、どれくらいの取水が可能であるかを求める。また、現在の定められている取水量を満たすためには、冬期どの程度の確保貯水量が必要かを検討する。

(c) 日間運用スケジュールの自動作成

現在、貯水池運用管理事務所の日課となっている発電スケジュールの作成を自動化し、日間の各時間常において水需要を完全に満たしかつ電力会社との打合せによる電力負荷パターンにできるだけ合致した発電スケジュールを計算機により作成する。

(d) 河川流出、流下特性解析プログラム

水系制御の基本となる水系特性の解明には、従来の土木解析の手法にとらわれず、種々のアプローチが試みられている。

(e) 出水時ゲート制御のシミュレーション

出水時のゲート放流量制御は、原則として操作規程にもとづいておこなわれるが、予測の方法を含めて、種々の洪水に対する放流のあり方を、計算機による実験によって検討し、反省の材料とする。

5. むすび

多目的ダムを含む水系の状況把握にはじまり、水系諸特性の解明と水系全体を一貫した思想で集中管理するというシステムはわが国でも初めての試みであり各方面から注目されているものである。

システムは単能のいわゆるプロセスコンピュータの形式をとらずに、汎用計

算機を中心に，システム解析とオンラインデータ収集の併用という形をとり，水系の解明を行ないながら，一步一步初期の目的を達成していくという幾分贅沢なものとなっているが，見方を変えれば，年間を通じてたとえば冬期のように河川管理の比較的定常的な場合には計算機を他の目的に利用することができるという余地を残しており，限定された性能の単能機を専用に設置するよりも有効な一つの利用方式と云うことができる。